

75034

**SONLU ELEMENLAR YÖNTEMİ ile
ÇELİK POTASI REFRAKTER ASTARININ
İNCELENMESİ ve GELİŞTİRİLMESİ**

DOKTORA TEZİ

Y.Müh. Suat YILMAZ

75034

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 9 Aralık 1997

Tezin Savunulduğu Tarih : 20 Şubat 1998

Tez Danışmanı :

(İTÜ) Prof.Dr. Serdar ÖZGEN

(İTÜ) Prof.Dr. İsmail DUMAN

(İTÜ) Prof.Dr. Süheyla AYDIN

(YTÜ) Prof.Dr. Müzeyyen MARŞOĞLU

(İÜ) Prof.Dr. Osman ÖZKAN

04.03.1998

4.3.1998

4.3.98

09.03.1998

ŞUBAT 1998

İTÜ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
Kütüphane

İÇİNDEKİLER

SEMBOL LİSTESİ.....	V
ŞEKİL LİSTESİ.....	VII
TABLO LİSTESİ.....	XII
ÖNSÖZ.....	XIV
ÖZET.....	XV
SUMMARY.....	XVI
1 GİRİŞ VE AMAÇ.....	1
2 SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ (SEY).....	6
2.1 Sonlu Elemanlar Yöntemi'ne Giriş.....	6
2.2 Malzemenin Elastik Davranışı.....	8
2.3 Lineer Elastik Gerilme-Şekil Değiştirme Özellikleri ve SEY'e Uyarlanması..	10
2.4 Isı İletim Problemleri ve SEY'e Uyarlanması.....	15
2.4.1 Isı iletimi eşitliklerinin SEY ile çözümünde sınıflandırma.....	18
2.4.1.1 Zamana bağlı olmayan durum.....	19
2.4.1.2 Zamana bağlı olan durum.....	20
3 POTA METALURJİSİ, ÇELİK POTALAR VE REFRAKTERLERİ.....	22
3.1 Çelik Üretimi ve Pota Metalurjisi.....	22
3.2 Çelik Potaları Refrakterleri, Gelişimi ve Çalışma Şartları.....	28
3.3 Çelik Döküm Potalarında Kullanılan Bazik ve Spinel Refrakterler.....	30
3.3.1 Bazik refrakterler.....	30
3.3.2 Spinel refrakterler.....	35
4 REFRAKTERLERİN TERMAL, MEKANİK VE KİMYASAL ÖZELLİKLERİ.....	41
4.1 Termo-Mekanik Özellikler.....	41
4.1.1 Refrakterlik.....	41
4.1.2 Sabit basınç altında refrakterlik.....	42
4.1.3 Termal genleşme.....	44
4.1.4 Termal şok direnci.....	46
4.2 Termal Özellikler.....	46
4.2.1 Isı iletkenliği.....	46
4.2.2 Spesifik ısı kapasitesi.....	47
4.3 Fiziksel Özellikler.....	47
4.3.1 Porozite ve yığın yoğunluk.....	48
4.3.2 Soğukta basma mukavemeti.....	48

4.4 Kimyasal Özellikler.....	49
5 AŞINMA ASTARI MgO-C/MgO ve MgO-Al ₂ O ₃ -spinel REFRAKTERLERLE ÖRÜLÜ ÇELİK DÖKÜM POTASI REFRAKTER ASTARININ SEY ile MODELLENMESİ ve TERMAL, MEKANİK, TERMOMEKANİK DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ VE SONUÇLARI.....	52
5.1 Sonlu Elemanlar Analizlerine Giriş.....	52
5.2 Sonlu Elemanlar Modelinin Hazırlanması.....	54
5.3 Termal Analiz.....	57
5.4 Mekanik ve Termomekanik Analizler.....	69
6 MgO, MgO-C ve MgO-Al ₂ O ₃ -Spinel REFRAKTERLER ÜZERİNE YAPILAN DENEYSEL ÇALIŞMALAR VE SONUÇLARI.....	83
6.1 Çalışmalarda Kullanılan Refrakter Malzemeler ve Hazırlanışı.....	83
6.1.1 Magnezit ve magnezit-karbon refrakter hammaddeleri, kimyasal bileşimleri ve numunelerin hazırlanışı.....	83
6.1.2 Magnezya-Alümina-Spinel dökme refrakter hammaddeleri, kimyasal bileşimleri ve numunelerin hazırlanışı.....	87
6.2 Refrakter Malzemelerin Fiziksel Özellikleri.....	89
6.2.1 Porozite tayini.....	89
6.2.2 Hacim ağırlığı tayini.....	90
6.2.3 Soğukta basma mukavemeti tayini.....	91
6.2.4 Sıcakta sabit basınç altında refrakterlik.....	91
6.3 Refrakterlerin Faz Yapıları.....	96
6.4 Mikro Yapı İncelemeleri.....	98
6.5 Refrakterlerin Cüruf-la Etkileşiminin Pota Yöntemi ile Belirlenmesi ve İncelenmesi.....	100
6.5.1 Çalışmada kullanılan endüstriyel cürufun özellikleri.....	100
6.5.2 Refrakter potaların hazırlanması, deneyin yapılışı ve ilk gözlemler.....	102
6.5.3 Cüruf-refrakter etkileşiminin çeşitli yönlerden incelenmesi.....	103
6.5.3.1 Cürufun refrakter içinde yayınma alanının tespiti.....	103
6.5.3.2 Cüruf-refrakter etkileşiminde meydana gelen fazların incelenmesi.....	105
6.5.3.3 Cürufun refrakter içinde çözünürlüğünün incelenmesi.....	107
7 SONUÇLARIN İRDELENMESİ VE ÖNERİLER.....	110
7.1 Sonlu Elemanlar Analizleri Sonuçlarının İrdelenmesi.....	110
7.1.1 Termal özelliklerin irdelenmesi.....	110
7.1.2 Mekanik ve termomekanik özelliklerin irdelenmesi.....	111
7.2 Deneysel Çalışma Sonuçlarının İrdelenmesi.....	112
7.2.1 Mekanik ve termo-mekanik özelliklerin irdelenmesi.....	112
7.2.2 Cüruf-refrakter etkileşimi sonuçlarının irdelenmesi.....	113
7.3 Genel Sonuç İrdelemesi.....	115
KAYNAKLAR.....	117
EK A.....	121
EK B.....	125

EK C.....	130
EK D.....	132
EK E.....	137
ÖZGEÇMİŞ.....	143



SEMBOL LİSTESİ

$[K]$	: Rijitlik matrisi
$\{a\}$	: Düğüm noktası bilinmeyenleri vektörü
$\{f\}$	: Yük vektörü
$\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$	: x, y, z yönlerindeki temel normal gerilmeleri
$\epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_z$	: x, y, z yönlerindeki şekil değiştirme miktarları
E	: Elastisite modülü
ν	: Poisson sabiti
$\tau_{xy}, \tau_{xz}, \tau_{yz}$	: Kayma gerilmeleri
$\gamma_{xy}, \gamma_{xz}, \gamma_{yz}$	: Kayma sonucu meydana gelen şekil değiştirme miktarları
G	: Kayma modülü
$\epsilon_r, \epsilon_\theta, \gamma_{rz}$	: Simetrik yapılarda; radyal, açısal şekil değiştirme miktarları ve kayma şekil değiştirme miktarı
$[D]$	: Elastisite matrisi
$\{\epsilon\}$	: Şekil değiştirme vektörü
$\{\sigma\}$	: Gerilme vektörü
u, v, w	: Düğüm noktası yer değiştirme miktarları
$[B]$	: Dönüştürme matrisi
$\{\delta\}$	: Düğüm noktası yer değiştirmeleri vektörü
q_x, q_y, q_z	: x, y, z yönlerinde yüzeyde taşınmakta olan ısı akımları
k_x, k_y, k_z	: x, y, z yönlerindeki ısı iletim katsayıları
q^B	: Birim hacime düşen ısı akımı miktarı

θ	: Malzemenin sıcaklığı
θ_e	: Dış ortam sıcaklığı
θ_r	: Dış radyasyon kaynaklarından gelen sıcaklık
q^s	: Yapı yüzeyine kadar ulaşan ısı akımı değeri
h	: Sıcaklığa bağımlı konveksiyon katsayısı
q^c	: Isı akım hızı
C	: Malzemenin hacmi başına düşen ısı kapasitesi
c	: Spesifik ısı
$^{t+\Delta t}\theta_1 \dots ^{t+\Delta t}\theta_n$	: $t+\Delta t$ zamanı içindeki düğüm noktası sıcaklıkları vektörleri
H, B	: Eleman sıcaklık interpolasyon matrisi
H^s	: Yüzey sıcaklık interpolasyon matrisi
K^k	: Isı iletim matrisi
K^c	: Konveksiyon matrisi
$^{t+\Delta t}k$	: Isı iletim katsayılar matrisi
$^{t+\Delta t}h$	: Konveksiyon katsayılar matrisi
$^{t+\Delta t}Q$	: $t+\Delta t$ zamanı içinde bir uçtan bir uca taşınmış ısı akımı
$^{t+\Delta t}Q_c$	: $t+\Delta t$ zamanı içinde bir uçtan bir uca taşınmış konvektif ısı akımı
$^{t+\Delta t}Q_B$	: $t+\Delta t$ zamanı içinde birim hacimde taşınmış ısı akımı
$^{t+\Delta t}Q_s$	: $t+\Delta t$ zamanı içinde birim yüzeyde taşınmış ısı akımı
$t_0, t_a, t_c, T_{0.5}, T_1 \dots$	: Sabit basınç altında refrakterlik kriterleri
d, d_h	: Teorik ve ham yoğunluk
M_K, M_D, M_A	: Kuru, doymuş, askı ağırlıkları
$\theta_{açı}$	: Temas açısı
ϕ	: Ara açısı

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1	İki boyutlu gerilme-şekil değiştirme durumu	6
Şekil 2.2	Üç boyutlu gerilme-şekil değiştirme durumunda temel gerilmeler ve kayma gerilmeleri	9
Şekil 2.3	Eleman düğüm noktası yer değiştirmeleri	10
Şekil 2.4	Eksenel simetrik katı yapıda koordinatlar ve yer değiştirmeler	12
Şekil 2.5	Eksenel simetrik elemanda gerilme-şekil değiştirme durumu	13
Şekil 2.6	Üç boyutlu bir katıda ısı iletimi	15
Şekil 2.7	SEY'e göre model hazırlama ve hesaplamaların işlem akım şeması	21
Şekil 3.1	Çelik üretiminin farklı yöntemleri	22
Şekil 3.2	Çeşitli oksijen konverterleri	24
Şekil 3.3	Sıvı çelik döküm potası	25
Şekil 3.4	Pota fırını	27
Şekil 3.5	Doğal magnezitten sinter-MgO üretimi akım şeması	32
Şekil 3.6	Deniz suyundan sinter-MgO üretim akım şeması	33
Şekil 3.7	Termik parçalanma yoluyla $MgCl_2$ 'den sinter-MgO üretimi	34
Şekil 3.8	Spinel kafes yapısının şematik görünümü	35
Şekil 3.9	$MgO-Al_2O_3$ faz diyagramı	37
Şekil 3.10	$MgO-Al_2O_3$ -spinel üretim akım şeması	38
Şekil 3.11	Vibrasyonla pota astarının dökülebilir refrakterle örümünün şematik gösterimi	40
Şekil 4.1	Yüksek sıcaklık mikroskobu ile yapılan refrakterlik deneyinde oluşumların şematik gösterimi	41
Şekil 4.2	Çeşitli refrakterlerin yüksek sıcaklıklarda $2kp/cm^2$ sabit yük altında refrakterlik davranışları	42
Şekil 4.3	Refrakterlerin yüksek sıcaklıkta basınç altında uzun süreli akma davranışları	43

Şekil 4.4	Bazı refrakter tuğlaların termal genleşmeleri	44
Şekil 4.5	Çeşitli refrakterlerin ısı iletkenlikleri	46
Şekil 4.6	Sıvı cüruf ile refrakterin yüzey gerilimi arasındaki temas açısının şematik gösterimi	49
Şekil 4.7	Ara açısının şematik gösterimi	50
Şekil 5.1	Potanın aksel simetrik kesit görünümü ve teknik ayrıntılar	52
Şekil 5.2	SEY'e göre yapılan hesaplamalarda izlenen yol ve işlem adımları	54
Şekil 5.3	Potanın üç boyutlu kesit görünümü	55
Şekil 5.4	Standart sonlu elemanlar modeli ve modele ilişkin istatistikler	55
Şekil 5.5	8-düğümli aksel simetrik, izoparametrik dörtgen eleman	56
Şekil 5.6	MgO-C/MgO dizaynı içinde kullanılan refrakterlerin ısı iletkenliklerinin sıcaklıkla değişimi	58
Şekil 5.7	MA-spinel dizaynı içinde kullanılan refrakterlerin ısı iletkenliklerinin sıcaklıkla değişimi	58
Şekil 5.8	St ve MgO-C/MgO dizaynına ait pota refrakter astarı içindeki sıcaklık dağılımı	60
Şekil 5.9	St ve MA-spinel dizaynına ait pota refrakter astarı içindeki sıcaklık dağılımı	60
Şekil 5.10	Stk ve MgO-C/MgO dizaynına ait pota refrakter astarı içindeki sıcaklık dağılımı	61
Şekil 5.11	Stk ve MA-spinel dizaynına ait pota refrakter astarı içindeki sıcaklık dağılımı	61
Şekil 5.12	Stg ve MgO-C/MgO dizaynına ait pota refrakter astarı içindeki sıcaklık dağılımı	62
Şekil 5.13	Stg ve MA-spinel dizaynına ait pota refrakter astarı içindeki sıcaklık dağılımı	62
Şekil 5.14	St ve MgO-C/MgO dizaynı refrakter astar duvarındaki sıcaklık dağılımı	63
Şekil 5.15	St ve MA-spinel dizaynı refrakter astar duvarındaki sıcaklık dağılımı	63
Şekil 5.16	Stk ve MgO-C/MgO dizaynı refrakter astar duvarındaki sıcaklık dağılımı	64
Şekil 5.17	Stk ve MA-spinel dizaynı refrakter astar duvarındaki sıcaklık dağılımı	64
Şekil 5.18	Stg ve MgO-C/MgO dizaynı refrakter astar duvarındaki sıcaklık dağılımı	65

Şekil 5.19	Stg ve MA-spinel dizaynı refrakter astar duvarındaki sıcaklık dağılımı	65
Şekil 5.20	Farklı refrakter türüne ve farklı kalınlıklara sahip astarlardaki sıcaklık gradyanlarının karşılaştırmalı olarak incelenmesi	66
Şekil 5.21	Sıvı çelik dökümü öncesi potaya uygulanan ön ısıtma rejimi periyodu	68
Şekil 5.22	Sıvı çelik ve sıvı cüruf sisteminin pota astar duvarı üzerine uyguladığı hidrostatik basıncın şematik gösterimi	69
Şekil 5.23	MgO-C/MgO dizaynı içinde kullanılan refrakterlerin ısı genleşmeleri	70
Şekil 5.24	MgO-C/MgO dizaynı içinde kullanılan refrakterlerin E-modül değerleri	70
Şekil 5.25	MA-spinel dizaynı içinde kullanılan refrakterlerin ısı genleşmeleri	71
Şekil 5.26	.MA-spinel dizaynı içinde kullanılan refrakterlerin E-modül değerleri	71
Şekil 5.27	St ve MgO-C/MgO dizaynına ait pota refrakter astarı içindeki hidrostatik basınç nedeniyle meydana gelen elastik yer değiştirmeler	72
Şekil 5.28	St ve MgO-C/MgO dizaynına ait pota refrakter astarı içindeki termal genleşmeler nedeniyle meydana gelen elastik yer değiştirmeler	72
Şekil 5.29	St ve MA-spinel dizaynına ait pota refrakter astarı içindeki hidrostatik basınç nedeniyle meydana gelen elastik yer değiştirmeler	73
Şekil 5.30	St ve MA-spinel dizaynına ait pota refrakter astarı içindeki termal genleşmeler nedeniyle meydana gelen elastik yer değiştirmeler	73
Şekil 5.31	Stk ve MgO-C/MgO dizaynına ait pota refrakter astarı içindeki hidrostatik basınç nedeniyle meydana gelen elastik yer değiştirmeler	74
Şekil 5.32	Stk ve MgO-C/MgO dizaynına ait pota refrakter astarı içindeki termal genleşmeler nedeniyle meydana gelen elastik yer değiştirmeler	74
Şekil 5.33	Stk ve MA-spinel dizaynına ait pota refrakter astarı içindeki hidrostatik basınç nedeniyle meydana gelen elastik yer değiştirmeler	75
Şekil 5.34	Stk ve MA-spinel dizaynına ait pota refrakter astarı içindeki termal genleşmeler nedeniyle meydana gelen elastik yer değiştirmeler	75
Şekil 5.35	Stg ve MgO-C/MgO dizaynına ait pota refrakter astarı içindeki hidrostatik basınç nedeniyle meydana gelen elastik yer değiştirmeler	76
Şekil 5.36	Stg ve MgO-C/MgO dizaynına ait pota refrakter astarı içindeki termal genleşmeler nedeniyle meydana gelen elastik yer değiştirmeler	76
Şekil 5.37	Stg ve MA-spinel dizaynına ait pota refrakter astarı içindeki hidrostatik basınç nedeniyle meydana gelen elastik yer değiştirmeler	77

Şekil 5.38	Stk ve MA-spinel dizaynına ait pota refrakter astarı içindeki termal gerileşmeler nedeniyle meydana gelen elastik yer değıştirmeler	78
Şekil 5.39	Hidrostatik gerilmeler sonucu pota astarında meydana gelen deformasyonun simulasyonu	79
Şekil 5.40	Termal gerilmeler sonucu pota astarında meydana gelen deformasyonun simulasyonu	79
Şekil 5.41	Standart pota astarı cüruf bölgesi içinde termal gerilmelere bağılı yer değıştirme miktarlarının astar boyunca değışimi	81
Şekil 5.42	MgO-C/MgO ve MA-spinel ile bunların farklı kalınlıklardaki astarlarında termal gerilmelere sonucu oluşan maksimum yer değıştirmeler	81
Şekil 6.1	MgO tanelerinin etrafını sarmış grafit pullarının genel görünümü	86
Şekil 6.2	MgO ve MgO-C refrakterlerin yük altında refrakterlik deneyi sonuçları	94
Şekil 6.3	MA-spinel refrakterlerin yük altında refrakterlik deneyi sonuçları	95
Şekil 6.4	MgO refrakterin x-ışınları faz analizi	96
Şekil 6.5	%15 C (grafit) katkılı MgO refrakterin x-ışınları faz analizi	97
Şekil 6.6	MA-spinel refrakterin x-ışınları faz analizi	97
Şekil 6.7	MgO refrakterin optik mikroskop altındaki mikro yapı görüntüsü	98
Şekil 6.8	MA-spinel refrakterin optik mikroskop altındaki mikro yapı görüntüsü	98
Şekil 6.9	MgO refrakter tuğlanın kırık yüzeyinin SEM ile çekilmiş görüntüsü	99
Şekil 6.10	MgO-C refrakter tuğlanın kırık yüzeyinin SEM ile çekilmiş görüntüsü	99
Şekil 6.11	MA-spinel refrakter tuğlanın kırık yüzeyinin SEM ile çekilmiş görüntüsü	100
Şekil 6.12	Çelik pota cürufu numunesinin x-ışınları faz analizi	101
Şekil 6.13	CaO-MgO-Al ₂ O ₃ üçlü faz denge diyagramı	101
Şekil 6.14	MgO-C tuğla refrakterlerin cürufu etkileşim bölgeleri	103
Şekil 6.15	MA-spinel dökme refrakterlerin cürufu etkileşim bölgeleri	103
Şekil 6.16	1500°C'de meydana gelen cüruf-refrakter korozyonu	104
Şekil 6.17	1600°C'de meydana gelen cüruf-refrakter korozyonu	104
Şekil 6.18	MgO-C refrakterin 1600°C'de 16 saat cürufu etkileşmiş bölgesinden alınan örneğin x-ışınları faz analizi	106

Şekil 6.19	MA-spinel refrakterin 1600°C'de 16 saat cürufle etkileşmiş bölgesinden alınan örneğin x-ışınları faz analizi	106
Şekil 6.20	MgO ve MA-spinel refrakterlerin cüruf içindeki çözünürlüğünün Kaldıraç Kanunu ile belirlenmesinin şematik gösterimi	107
Şekil 6.21	Cüruf ile MgO-C refrakter etkileşim bölgesinden çekilmiş optik mikroskop görüntüsü	108
Şekil 6.22	Cüruf ile MA-spinel refrakterin etkileşim bölgesinden çekilmiş optik mikroskop görüntüsü	109
Şekil 7.1	Pota aşınma astarının; cüruf bölgesinde, %15C-MgO tuğla ve sıvı çelik bölgesi duvar ile tabanında, TA43 dökülebilir refrakterleriyle dizaynının gösterimi	116
Şekil B.1	4-düğömlü eleman üzerinde ısı iletimi ile ilgili parametrelerin SEY ile hesaplanması	
Şekil B.2	Sonsuz bir plakada ısı iletimi ile ilgili parametrelerin SEY ile hesaplanması	

TABLO LİSTESİ

Tablo 2.1	Alan problemi hesaplamalarındaki benzeşimler	21
Tablo 3.1	Spinel örneklerinin kimyasal bileşim özellikleri	36
Tablo 3.2	Spinel örneklerinin fiziksel özellikleri	36
Tablo 5.1	SEY ile yapılan çalışmanın temel değişkenleri	53
Tablo 5.2	MgO-C/MgO dizaynına sahip pota astarı refrakter malzemelerinin kimyasal özellikleri	57
Tablo 5.3	MA-spinel dizaynına sahip pota astarı refrakter malzemelerinin kimyasal özellikleri	57
Tablo 6.1	MgO refrakter tuğlanın kimyasal bileşimi	83
Tablo 6.2	Deneylerde kullanılan sinter-MgO'in tane iriliği fraksiyonları	84
Tablo 6.3	KÜMAŞ orijinli sinter-MgO'in kimyasal bileşimi	84
Tablo 6.4	Deniz suyu sinter MgO'in kimyasal bileşimi	84
Tablo 6.5	Ergimiş magnezitin kimyasal bileşimi	84
Tablo 6.6	MgO-C refrakter tuğla üretiminde kullanılan pulsu grafitin tane iriliği dağılımı	85
Tablo 6.7	Grafit külünün kimyasal bileşimi	85
Tablo 6.8	MgO-C refrakter tuğlaların kimyasal bileşimi	86
Tablo 6.9	MA-spinel numunelerin üretiminde kullanılan hammaddelerin kimyasal bileşimi	87
Tablo 6.10	MA-spinel dökme refrakter numunelerinin hazırlanmasında kullanılan karışımların reçetesi	88
Tablo 6.11	MA-spinel numunelerin elek analizi sonuçları	88
Tablo 6.12	MA-spinel dökme refrakterlerin kimyasal bileşimi	88
Tablo 6.13	Su emme ve görünür porozite ölçüm sonuçları	90
Tablo 6.14	Kuru ham yoğunluk ve hacim ağırlığı ölçüm sonuçları	90
Tablo 6.15	Refrakterlerin soğukta basma mukavemetleri	91
Tablo 6.16	Sıcakta yük altında refrakterlik deneyi sonuçları	93

Tablo 6.17	Endüstriyel çelik pota cürufu numunesinin kimyasal bileşimi	100
Tablo 7.1	Pota astarı içinde oluşan yer değiştirmelerin şiddeti ve yönlerinin karşılaştırmalı olarak değerlendirilmesi	111
Tablo A.1	Isı iletimi/geçışı hesaplamaları için lineer olmayan eşitliklerin lineerleştirilmesi	
Tablo B.1	Isı iletimi/geçışı problemlerinin lineer olmayan hesaplamaları için SEY matrisleri	



ÖNSÖZ

Lisans ve Yüksek Lisans Tezlerinden sonra, Doktora Tez çalışmasını da birlikte gerçekleştirdiğimiz, sayın hocam Prof.Dr.Ö. Serdar ÖZGEN'e çalıştığımız uzun yıllar boyunca bana kazandırdığı tüm değerler için şükranlarımı sunarım.

Çalışmalarım sırasında ve Araştırma Görevlisi olarak, her konuda değerli fikirlerini paylaşmama izin veren, Üretim Metalurjisi Anabilim Dalı Başkanımız sayın hocam Prof.Dr. İsmail DUMAN'a, tüm yardımlarından dolayı teşekkürlerimi sunarım.

Bu tez çalışmasının önemli bir bölümünü gerçekleştirebildiğim Avusturya Graz Teknik Üniversitesi, Zemin Mekaniği Enstitüsü Başkanı sayın Prof.Dr. Stefan SEMPRICH'e ve bilim danışmanım Ass.Prof.Dr. Helmut F.SCHWEIGER'e, Asistan arkadaşlarım Dipl.Ing. Michael FREISEDER'e ve Dipl.-Ing. Roman MARTE'ye araştırmalarım sırasında gösterdikleri dostluk ve yardımlarından dolayı teşekkür ederim. Bu çalışmanın gerçekleşmesine burs desteği sağlayan; İstanbul Avusturya Kültür Ateşesi sayın Dr. Erwin LUCIUS'a ve ÖAD (Avusturya Akademik Değişim Programı) Servisi'ne teşekkürlerimi sunarım.

Üniversite-Sanayii işbirliğine iyi bir örnek oluşturması için gayret ettiğimiz bu çalışmada, işbirliğini somut hale getirmede büyük katkılarında ve yardımlarından dolayı ERDEMİR A.Ş.'den Refrakterler Müdürü sayın Ali AYDOĞAN'a, Çelikhane Baş Mühendisi sayın Şafak ÇAPAR'a ve Laboratuvarlar Müdürü sayın Mehmet KAHRAMAN'a, SÜPERATEŞ Refrakter San. ve Tic. A.Ş.'den sayın Faik İLHAN'a ve çalışanlarına, SÖRMAŞ Söğüt Refrakter Sanayii ve Tic. A.Ş. çalışanlarına ve METAMİN Mümessillik San. ve Tic. A.Ş.'den sayın Yalçın SÖNMEZLER'e ve Çağatay DURMUŞ'a sonsuz teşekkürler ederim.

Özellikle tezin yazımı aşamasında, yardımlarını esirgemedi sunan, gerekli eleştiri ve önerileriyle tezin oluşmasında katkıları bulunan sayın hocam Prof.Dr. Feridun DİKEÇ'e ve sayın hocam Prof.Dr. Yalçın AKÖZ'e teşekkürü borç bilirim.

Araştırma Görevlisi olarak ve tez çalışmalarım sırasında, Seramik Laboratuvarlarını paylaştığım arkadaşlarım Araş.Gör.Y.Müh. Cengiz HAMZAÇEBİ'ye, Müh. Turan TAMBAŞ'a ve Kimya-Metalurji Fakültesi'ndeki tüm arkadaşlarıma, çalışanlarına teşekkür ederim.

Aileme; göstermiş oldukları özveri, duyarlılık ve anlayıştan dolayı şükranlarımı sunarım.

ÖZET

Sıvı Çelik Potası Refrakter Astar Sistemi'nin termomekanik davranışlarının, Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY)'nin kullanımı desteğinde incelendiği çalışma, genel olarak iki kısım olarak planlanmıştır. İlk aşama olarak; SEY ile pota astarı sisteminin, çalışma şartları içinde -konverterden sıvı çelik dökümü sonrası- termal, mekanik ve termomekanik davranışları simüle edilerek incelenmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla, bazik esaslı potalarda yaygın kullanımı bulunan magnezit ve magnezit-karbon tuğla ile örülmüş aşınma astarlı sistemin yanı sıra yeni geliştirilmekte olan ve bu malzemelere alternatif olarak sunulan magnezya-alümina-spinel dökme refrakter astar malzemesinin uygunluğunun araştırılması yapılmıştır. Çalışmanın ikinci kısmında ise, SEY çözümlerinin değerlendirmelerine destek olması da düşünülerek; magnezit (MgO), magnezit-karbon (MgO-C) tuğla refrakterler ve magnezya-alümina-spinel (MgO-Al₂O₃-spinel ya da MA-spinel) dökülebilir refrakterlerin mekanik, termomekanik ve kimyasal özelliklerinin deneysel olarak araştırılması, böylece pota astarı uygulamalarındaki performanslarının kıyaslamalı olarak değerlendirilmesi amaçlanmıştır.

Çalışmanın konusu olan sıvı çelik potasının; MgO-C/MgO ve MgO-Al₂O₃-spinel aşınma astarlı dizaynları olmak üzere iki ayrı SEY modeli hazırlandıktan sonra, ilk olarak yapılan termal analizlerinin sonuçlarına göre; MA-spinel'li astarın MgO-C/MgO'li astara kıyasla daha dik sıcaklık gradyanına sahip olduğu görülmüştür. Böylece, aşınma astarı MA-spinel malzemeyle örülen bir pota astar sisteminde potayı en dıştan saran çelik mantonun sıcaklığı, daha düşük seviyelere çekilebilecek ve bununla ısı kayıplarının önüne geçilerek, enerji tasarrufu sağlanabilecektir. Cüruf bölgesinde de aynı sonucun geçerli olmasına karşın, bu bölgede cürufa karşı korozyon direnci bakımından MgO-C refrakterin MA-spinel'e kıyasla daha üstün olduğu deneysel olarak tespit edilmiş, dolayısıyla cüruf bölgesinde tercih edilmesi bakımından avantajlı konuma geçmiştir. Mekanik ve termomekanik özelliklerin belirlenmesine yönelik yapılan SEY analizlerinin sonuçlarına göre; termal genleşme sonucu meydana gelen yer değiştirmelerin, hidrostatik basınç nedeniyle meydana gelen yer değiştirmelerden oldukça fazla olduğu ve dikkate alınması bakımından çok daha önem taşıdığı görülmüştür. Termal gerilme/genleşmelerin cüruf bölgesinin üst kısmında maksimuma ulaştığı belirlenmiş, MA-spinel'in, MgO ve MgO-C refraktere kıyasla yüksek sıcaklıklarda daha mukavemetli olduğu gözlenmiştir. Mekanik ve termomekanik özelliklerin araştırılması için yapılan deneysel çalışmalardan biri olan Sıcakta Yük altında Refrakterlik deneyine göre, MA-spinel'in, 1600°C'ye kadar olan sıcaklıklarda, MgO ve MgO-C refrakterlere göre daha az termal genleşme özelliği gösterdiği tespit edilerek, SEY ile elde edilen sonuç desteklenmiştir.

Çalışmaların sonucunda; MA-spinel dökülebilir refrakter malzemesinin, gerek termal, gerekse mekanik ve termomekanik davranışlarının MgO-C ve MgO tuğla refrakter malzemelere kıyasla daha üstün olduğu, fakat kimyasal açıdan cürufa karşı direncinin MgO-C refrakter malzemesine göre düşük olduğu ortaya çıkması nedenleriyle potanın; sıvı çelik bölgesi duvar ve taban aşınma astarında MA-spinel dökülebilir refrakterlerin, cüruf bölgesi aşınma astarında ise MgO-C tuğla refrakterlerin kullanımının uygun olacağı belirlenmiştir.

SUMMARY

ANALYSES AND DEVELOPMENT OF REFRACTORY LINING IN BASIC STEEL LADLE BY FINITE ELEMENTS METHOD

The Steel industry has been employing all necessary measures in order to increase the efficiency and productivity of the process. In recent years, the rapid development of computer technology had important contributions for that purpose in design, and manufacturing aspects of the industry. The application of Finite Element Method (FEM) has been an important development towards finding solutions for engineering problems and steel industry has also started to benefit from the widening application of this method.

The secondary metallurgy process has also joined relative importance in the last decade for high quality molten steel processing. The ladle technology, which is a major part of this process, has developed for more efficient melt refining. Refractory materials used in ladles has always been an important factor in this development since the refractory performance determines the lifetime of the ladle campaign. Basic refractories has been the dominant materials in this application, and the development of carbon-containing magnesia bricks had considerable contribution in extending the period of ladle process. These materials have replaced traditional magnesia or dolomite bricks especially at the slag zone of the ladles. Another development in steelmaking refractories is the new monolithic materials, which as castables provide important advantages against bricks, such as savings in lining cast and labour and better thermal properties. Recently studied castable materials for ladle applications include alumina spinel compositions as well as high alumina and corundum based materials.

One of the subjects of this thesis is to evaluate the properties of MA-spinel castables in comparison with carbon-containing magnesia refractories for steel ladle lining application. The study is planned to be in two sections: In the first phase, the thermal, mechanical and thermo-mechanical properties of ladle lining refractories were investigated by simulation using FEM analysis. In the second phase, experimental studies were conducted for preparation, and comparative evaluation of MA-spinel castables and MgO-C brick refractories.

1. FEM Analysis of Thermal, Mechanical and Thermo-mechanical Properties of 120 t Steel Ladle Lining

1.1 Problem Determination and Finite Element Modelling

Since the ladle has a axial symmetry, the model has been prepared as two dimensional according to the symmetry law. Femgen/Femview and MISES3 Software are used for modelling and FE Analyses. The section of the ladle showing different areas of the refractory lining is given in Fig.1. The lining constitutes wear, security and insulation layers before the steel casing. The FE model is used for the design analyses of both MgO-C/MgO based and MA-spinel ($\text{MgO-Al}_2\text{O}_3$ -spinel) based wear linings.

1.2 Material Properties and Boundary Conditions

The types of refractories selected for this study are MgO-C bricks for the wear lining in slag zone, and MgO bricks in molten steel zone. As alternative, MA-spinel castable refractory for both the slag and steel zones is analysed. In each case, the back-up linings consist of 42% Al_2O_3 firebrick and 30-40% Al_2O_3 fireclay insulations. The thermal and mechanical properties

of refractories which is taken into account the calculations. Thermal conductivity values are used for thermal analyses, and thermal expansion coefficient, E-modules and Poisson's ratio are used for mechanical analyses.

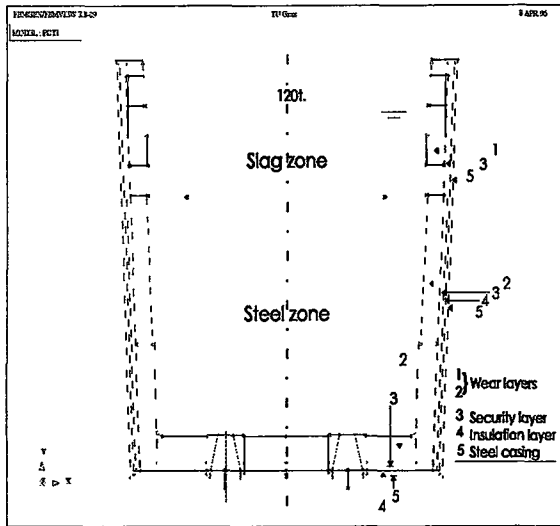


Fig.1 Geometrical model of ladle

1.3 Thermal Analyses

Thermal load on the refractory is one of the important parameters determining the service life of the lining. Therefore, thermal analyses has been applied to determine the temperature flow in the lining after the loading of molten steel in the ladle and within the boundary conditions, such as assuming 1500°C as the temperature in the ladle. The results of the analyses are given in Fig.2 for the slag zone lining and Fig.3 for molten steel lining. It can be seen from the Figures that the thermal gradient in the MA-spinel lining is more steep than the MgO-spinel lining in the slag zone and MgO-C lining in the steel zone. Therefore, the outer temperature is decreased and energy can be conserved.

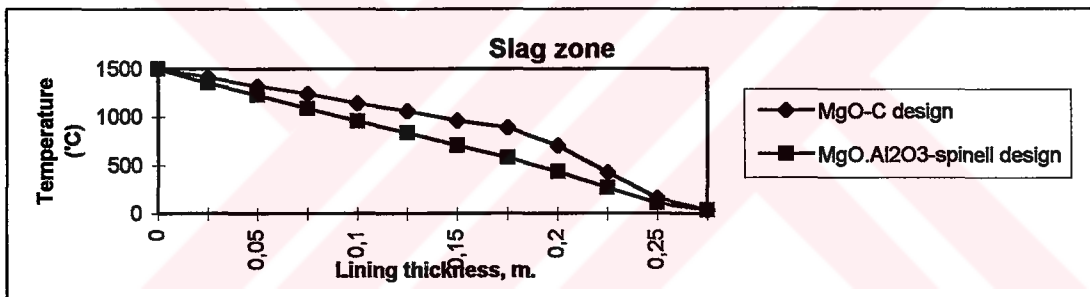


Fig. 2 Temperature gradient in the lining of slag zone

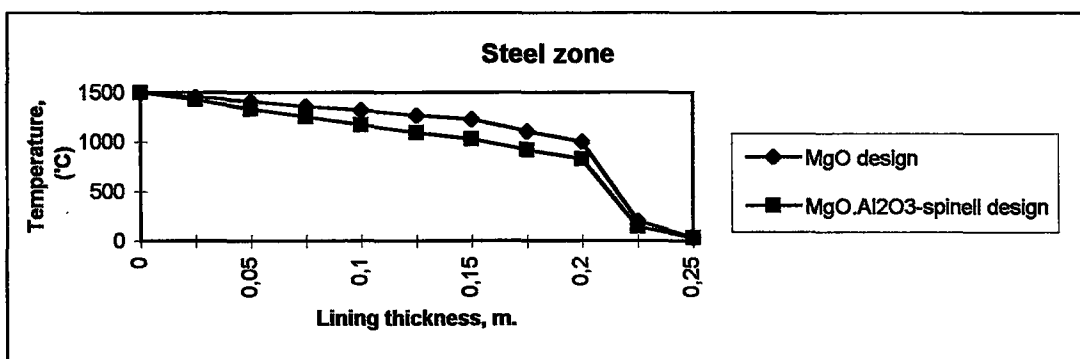


Fig. 3 Temperatur gradient in the lining of steel zone

1.4 Mechanical and thermomechanical Analyses

The refractory lining of the ladle is also under mechanical stress due to hydrostatic pressure from the molten steel held in the ladle. In the first phase, the distribution of stress and strain within the lining due to the hydrostatic pressure is calculated. In the second phase, the stress and strain due to the thermal expansion of the refractories is calculated. The stress

and strain due to the thermal expansion of materials were found to be much more than due to the hydrostatic pressure. A comparison of the results are given in Table 1 and the displacements in slag zone lining due to thermal expansion is given in Fig.4, for both types of refractories. The expansion of the MgO-C lining has been much pronounced in comparison to that of MA-spinel lining.

Table 1 Comparative evaluation of displacements in the ladle lining

	1) Hydrostatical stress		2) Thermal stress	
zone↓/stress direction →	x-dir.	y-dir.	x-dir.	y-dir.
Slag zone	≈0.00	≈0.00	→→→	↑↑↑
Steel zone	→	≈0.00	→→→	≈0.00
Bottom	≈0.00	↓	≈0.00	↑↑
(→↑:small, →→↑↑: large, →→→↑↑↑ : very large).				

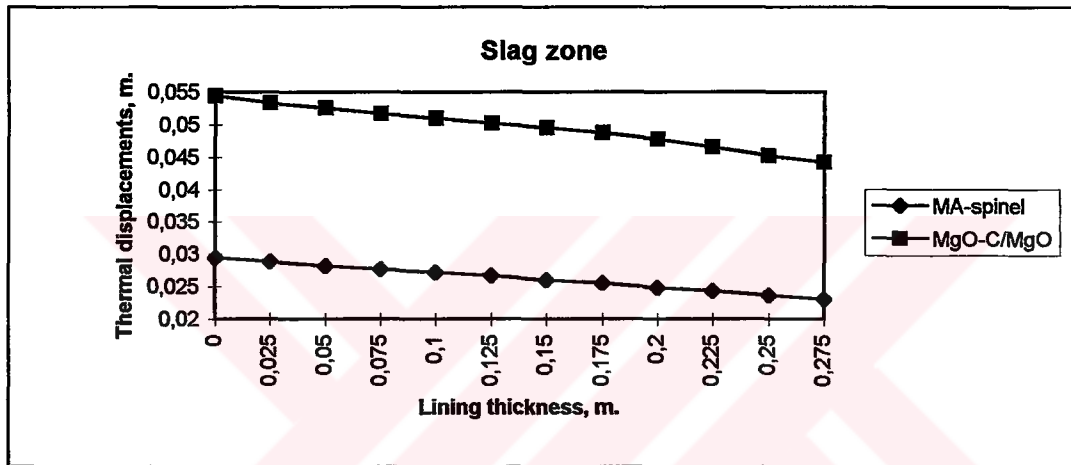


Fig. 4 The variation of displacement due to thermal stress within the slag zone

2. Experimental Studies for Production, and Properties of MgO, MgO-C and MgO-Al₂O₃-spinel Refractories

The FEM analyses of ladle linings are supported by experimental studies for determining physical and chemical properties of refractory materials. MgO-C refractory bricks are prepared of 5, 10, 15% graphite contents with 3% phenolic resin binder addition. The mixing and pressing of samples is followed by drying and tempering at 200°C to give strength. The chemical compositions of MgO-C refractories are given in Table 2.

Table 2 Chemical compositions of MgO-C refractories (%)

	MgO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO
%5C-MgO	98.27	0.54	0.44	0.39	0.25
%10C-MgO	98.14	0.59	0.46	0.43	0.28
%15C-MgO	98.04	0.63	0.48	0.46	0.31

MA-spinel castable refractories are prepared by mixing different contents of fine tabular alumina (Alcoa T60) and MA-spinel (Alcoa AR78) as raw materials. Also, reactive alumina, binder cement and dispersant are added to form the castable samples, and the compositions of mixtures are given in Table 3. The mixtures prepared by adding 5% water are cast into sample by vibratory table, which are then dried at 100°C for 24 hrs.

2.1 Physical Properties of Refractory Samples

The apparent porosity of samples are determined by DIN 51056 method and the results are given in Table 4. The bulk density of samples are determined by DIN 51065 and, cold crushing strengths are tested by DIN 51067 methods and the results are also given in the same table.

Tabel 3 Mixtures of MA-spinel castable refractories (%)

	Tabular alumina	MA-spinel	Reactiv alumina (CL370C)	Cement (Secar71)	Dispersant (calgon)
TA00	---	87.0	8.0	5.0	0.1
TA43	43.0	44.0	8.0	5.0	0.1
TA67	67.0	20.0	8.0	5.0	0.1

Tablo 4 Apparent porosity, bulk density and cold crushing strength values for test samples

	MgO	MgO-C			MA-spinel		
	SÖRK-M97	%5C	%10C	%15C	TA00	TA43	TA67
Apparent Porosity, %	17.4	4.20	3.85	3.38	12.49	9.66	9.78
Bulk Density, g/cm ³	2.90	2.95	3.00	3.07	2.89	3.13	3.03
Cold Crushing Strength, kg/cm ²	2.90	2.95	3.00	3.07	2.89	3.13	3.03

The refractoriness under load measurements are realised by DIN 51063 method under a load of 2 kg/cm² and the results are compared in Fig.5. The figure shows that the deformation due to thermal expansion is less for MA-spinel refractories than for MgO and MgO-C samples, until a temperature of around 1600°C.

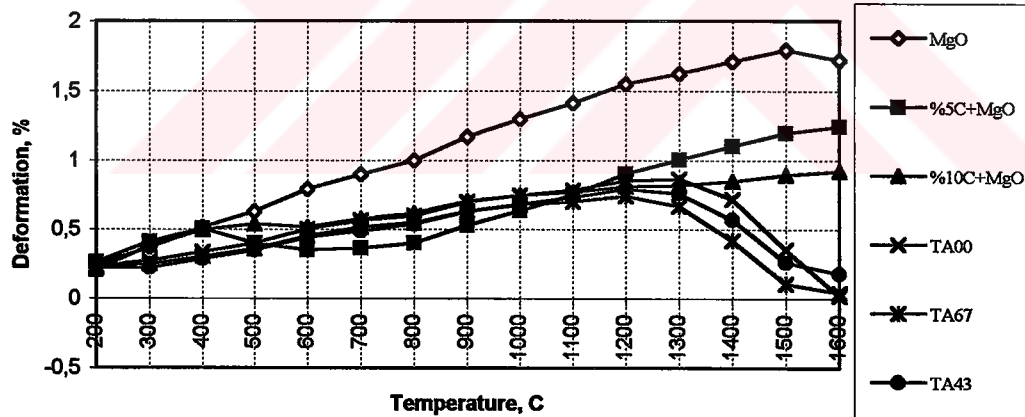


Fig. 5 Refractoriness under load test results for refractory samples

2.2 Slag Corrosion Resistance of Refractory Samples

The chemical corrosion resistance of refractory samples is obtained by DIN 51069 method, according which samples are drilled at a certain diameter to form small ladles into which powdered slag can be filled. Further to heating at 1500°C and 1600°C temperatures for certain time, the samples are cooled and cut axially to investigate for the extent of lag corrosion. The slag attack zone areas in the sample sections are measured and are shown in Fig.6 for MgO-C samples and Fig.7 for MA-spinel samples. The resistance of MgO-C refractories observed to increase with the graphite content with 15%C composition exhibiting highest corrosion resistance in comparison to other spinel samples. The extent of corrosion for MgO-C and MA-spinel refractories are compared at two temperatures in

Figures 8 and 9. All MgO-C samples have considerably higher slag attack resistance than MA-spinel refractories at both temperatures. Graphite phase has decreased the corrosive effect of slag due to its non-wetting property in content with the liquid slag.

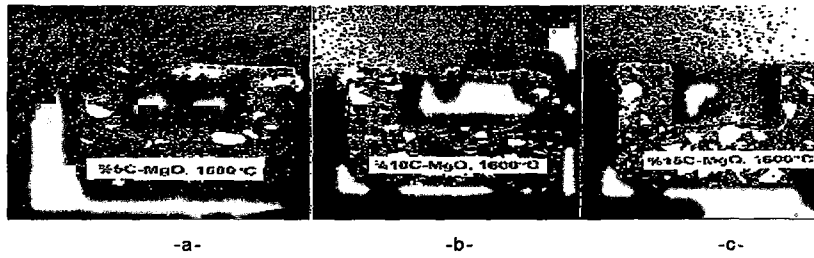


Fig. 6 Slag attack zones for MgO-C samples (a-5%C, b-10%C, c-15%C)

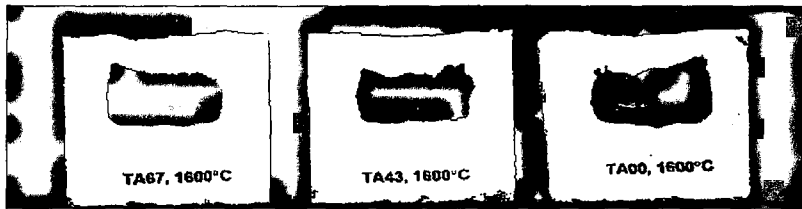


Fig. 7 Slag attack zones for MA-spinel samples
(a-67% tabular alumina, b-43% tabular alumina, c-without tab. alumina)

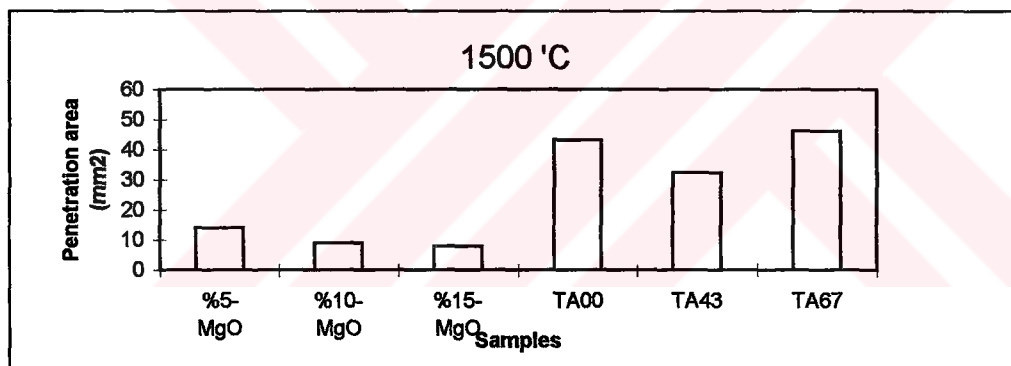


Fig. 8 Slag penetration areas for refractory samples at 1500°C

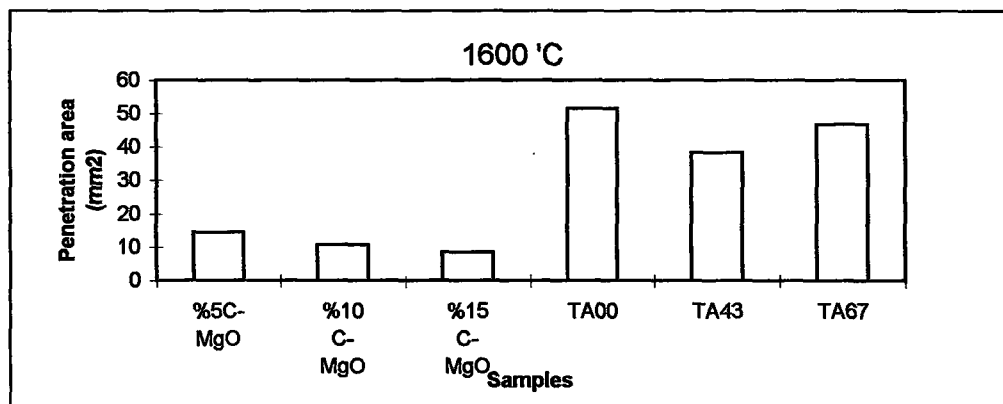


Fig. 9 Slag penetration areas for refractory samples at 1600°C

3. Conclusion

Finite Element Analysis method used for steel ladle refractory lining application results;

- Thermal Analyses : Temperature distribution and gradient determined for linings of different refractory qualities and the most suitable lining design is developed.
- Mechanical Analyses : The refractory and complete lining dimensions is optimised considering the stress and strain values of the refractories during operation.

When the properties of MgO-C/MgO refractories are compared with that of MA-spinel lining, the spinel castable is observed to exhibit better mechanical and thermomechanical behaviour. On the other hand, MgO-C bricks is found to have highest slag corrosion resistance. According to above results, as shown in Fig. 10, MA-spinel castable of 43% tabular alumina composition (TA43) can be proposed for the molten steel contact lining material at the sidewall and bottom of the ladle. 15% C-containing MgO-C brick refractory can be proposed for the slag contact lining material due to the highest slag corrosion resistance.

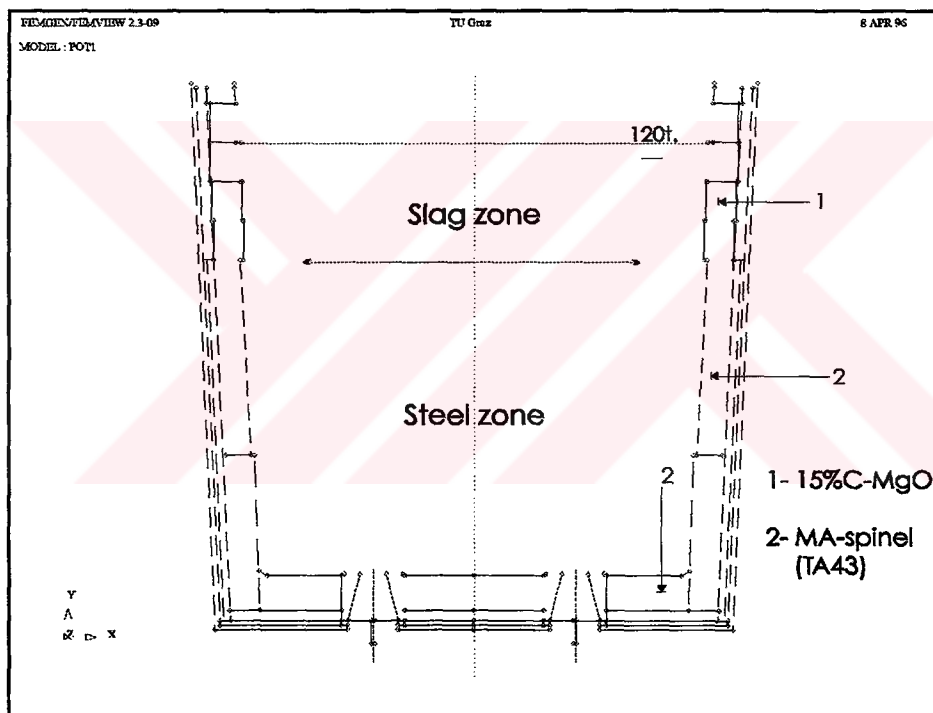


Fig. 10 Ladle lining design proposal according to the study results

1 GİRİŞ ve AMAÇ

Günümüzde çelik endüstrisinin genel hedefi, kalite yönetimi felsefesine uygun müşteri istekleri doğrultusunda üstün özelliklere sahip çelikleri, verimli ve ekonomik yollarla üretebilmenin standardını yakalamaktır. Zira yüksek teknoloji gereği gelişen imalat yöntemleri, değişik ve üstün özelliklere sahip ürünleri talep etmektedir. Çelik üretimindeki kaliteyi ve verimliliği arttırmaya yönelik çalışmaların önemli bir bölümü, üretim süreçlerinde kullanılmakta olan refrakter malzemeler üzerinde de yoğunlaşmaktadır. Araştırmalar sonucu ortaya konulan yeniliklerin yanı sıra, refrakter malzemelerin proses kontrol şartlarının geliştirilmesi de aynı değerde önem taşımaktadır.

Son yıllarda bilgisayar teknoloji ve sistemlerinin hızla gelişimine paralel olarak, hemen her tür mühendislik problemlerinin çözülmesine önemli bir ışık tutan matematiksel Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY)'nin kullanımı artmıştır. Bu artış, günden güne hızlı bir gelişim içinde olup, kullanım alanı giderek yaygınlaşmaktadır [1-3]. Bu gelişim çelik üretim teknolojisini de içine alarak değişik kademelerinde bilgisayar destekli tasarım, imalat ve yönetim gibi alanlarda önemli boyutlar kazanmaktadır.

1930'lu yıllardaki ilk bilgisayar prototipiyle beraber farklı hesap yöntemleri geliştirilmeye başlanmıştır. Bunlardan biri de Sonlu Elemanlar Yöntemi'dir. 1940'lı yıllarda matematikçi Courant [4, s11], bir sistemi üçgenlere ayırarak bunu nümerik interpolasyonla tam çözüme ulaştıran bir yöntem geliştirmiştir. Ancak o tarihlerde bu pek ilgi görmemiştir. Çünkü bu tür problemler için, büyük ve karmaşık eşitlikleri çözebilecek kapasiteye sahip bilgisayarlara gereksinim duyulmaktadır ve o tarihlerde bu tür bir bilgisayar henüz icat olunmamıştır. 1950'li yıllardan itibaren matematiksel matrislerin kullanımı, özellikle mühendislik problemlerinin -inşaat ve konstrüksiyon başta olmak üzere- pek çok çözümünde daima en çok tercih edilen yöntem olmuştur. Aynı tarihlerde mevcut bilgisayarlar, 100x100'lük matrislerden kurulu eşitlik sistemlerini çözebilmekteydi. Sonlu Elemanlar Yöntemi ifadesi ise, ilk kez 1956'da yayınladıkları bir yayınlarında Clough ve arkadaşları [4, s11]

tarafından kullanılmıştır. Bu tarihlerden sonra Sonlu Elemanlar Yöntemi'nin çeşitli evrimlere uğrayarak gelişimi devam etmiştir. Bu gelişimlerin başında, bilgisayar yazılım dili kullanılarak, çeşitli problemlerin çözümüne yönelik özel programların üretimi gelmektedir. 1970'li yıllarda, FORTRAN bilgisayar programlama dili kullanılarak 100 bin satırlara varan özel programlar yazılmıştır. FORTRAN başlangıçtan bu yana mühendislik/teknik programlama dili olarak kullanılmaktadır. Bathe, K.J., Wilson, E.L. ve Peterson, P.E.'nin FORTRAN dilini kullanarak yazdıkları ilk Sonlu Elemanlar paket bilgisayar programı, SAP4'tür [4, s11]. Bugün hala bu programın genişletilmiş ve yenilenmiş sürümleri kullanılmaktadır. İnteraktif bilgisayarların geliştirilmesiyle birlikte, SE-programları da yeni bir perspektif kazanmış, veri işleme ve sonuçların değerlendirilmesi (pre- and postprocessing) işlemlerini birlikte yapan programlar geliştirilmiştir [4].

Bugün artık ısı iletimi/geçışı, akışkanlar mekaniği, mekanik, statik, dinamik, manyetik, akustik v.b. mühendislik problemlerinin taleplerine cevap verebilen çok kapsamlı programlar üretilebilir hale gelmiştir. Bunun yanı sıra belli mühendislik problemlerinin çözümüne tam konsantre olmuş uzmanlık programları da üretilmeye başlanmıştır. Örneğin; otomotiv endüstrisi için gerekli, hareketli sistemlerin dinamik problemlerinde kullanılabilmesi için yazılmış programlar bulunduğu gibi, mekanik, ısı iletimi/geçışı, akışkanlar mekaniği ve gaz geçirgenliği gibi konularda yoğunlaşması beklenen metalurji endüstrisi için de bu tür programlar üzerinde çalışmalar mevcut olup, programların geliştirilmesine çalışılmaktadır. 80'li yılların sonlarından itibaren metalurji endüstrisinin çeşitli problemlerinin SEY yardımıyla çözümüne ilişkin uygulamalarda hızlı bir artış gözlenmektedir. Bunlar içinde özellikle demir-çelik sektörünü yakından ilgilendiren yüksek fırın, oksijen konverterleri, elektrik ark fırınları, potalar, sürekli döküm ve haddeleme gibi proseslerde çok çeşitli problemler üzerine SEY çözümleri üretilmektedir. Yüksek sıcaklıkta oluşan metalurjik proseslerinin vazgeçilmez parçası olan refrakter malzemeler ve refrakter astar sistemlerinin termo-mekanik özelliklerini çeşitli yönlerden inceleyen araştırmaların yoğunluğu da dikkat çekicidir. Örneğin; Kienow [5], Butter ve Boer [6], Bell ve Palin [7], Chen ve Büyüköztürk [8], fırın refrakter astarında kullanılan tuğlalardan birini fiziksel açıdan dikkate alarak, tuğlanın mekanik ve termo-mekanik gerilmelere karşı davranışları SEY ile simule edilmiş, tuğla içindeki küçük çatlakların oluşumu ve ilerleme mekanizmaları ile bunun yanıl ve düşeydeki mekanik ve termo-mekanik sonuçları üzerine etkileri tespit edilmeye

çalışılmıştır. Buradan elde edilen deneyimlerin ışığında daha sonraları bütün bir astarın termal ve termo-mekanik özellikleri simule edilmeye çalışılmıştır. Bu konuda Tseng ve Büyükoztürk [9], genel olarak ele aldığı bir refrakter astar sisteminin termo-mekanik davranışlarını, Rathner, Knauder ve Schweiger [10-12] ise oksijen konverterlerindeki refrakter astar sisteminin termal ve termo-mekanik davranışlarını SEY'e göre simule etmişler; böylece astardaki toplam gerilme miktarının yanı sıra, konverter tabanında kullanılan refrakter malzeme çeşidi ve boyutuna bağlı etkileri belirlemeye çalışmışlardır. Bunun yanında konverter içindeki gaz üfleme sistemleri gibi özel bölümlerin çalışma koşullarındaki davranışları da araştırılan konular arasında bulunmaktadır [13]. Rödl [14]'ün, pota metalurjisinin proses simülasyonu ile ilgili çalışmasının bir bölümünde pota refrakter duvarı ve astarı içindeki sıcaklık dağılımları, çalışma koşulları dikkate alınarak hesaplanmıştır. Bu çalışmalar, deneysel olarak elde edilmesi güç ya da olanaksız olan bilgilerin kazanılmasında oldukça yararlı sonuçlar vermişlerdir.

Demir-çelik endüstrisinde entegre işletmelerde veya elektrik ark fırınlı işletmelerde ikincil metalurji ya da pota metalurjisi olarak adlandırılan yöntemler çok önemli gelişme göstermişlerdir. Buna bağlı olarak potalarda kullanılmakta olan ve demir-çelik üretiminin en önemli girdilerinden birini oluşturan refrakter malzemelerin çeşidi ve uygulama teknikleri, yoğun bir araştırma-geliştirme konusu olmuştur. Pota kullanımının getirdiği bir çok avantaj nedeniyle daha çok tercih edilmeye başlandığı 1980'li yıllardan itibaren özellikle temiz çelik üretim felsefesi, ucuz asit astarlı pota geleneği yerine yeni ve geliştirilmiş refrakterlerle astarlanmış pota uygulamalarına geçilmesini zorunlu hale getirmiş olup, 1991 yılından itibaren bazik esaslı pota refrakter astar uygulamaları da geliştirilmiştir. Magnezit, yüksek alüminalı ve nihayet dolomit refrakter tuğlalar için yapılan araştırmalar sonucu, bu refrakter tuğlaların, pota içinde aşınma astarı olarak; cüruf bölgesi, sıvı çelik çalışma bölgesi ve tabanda kullanılmasına başlanmıştır. Magnezitin yeniden değerlendirilebilir olması bu refrakter türü üzerine araştırmaları derinleştirmiş ve karbon katkılı magnezit tuğla üretimi bu gelişimin bir halkasını oluşturmuştur. Özellikle cüruf bölgesinde karbonun sağladığı cürufa karşı üstün dayanım ve mukavemetli olması nedenleriyle magnezit-karbon tuğla refrakterler kısa zamanda tercih edilir olmuş ve 1993'ten itibaren kullanıma alınmıştır [15]. Bu arada yaygın kullanılsa bile pilot çapta ilk dökme pota refrakter astarları 1991 ortalarında denenmeye başlanmıştır. Önceden hazırlanan refrakter döküm harcının pota içindeki hazır şablona dökülmesiyle

yapılan bu işlemde sağlanan en önemli avantaj, işlemin tamamen mekanize hale getirilmesidir. Tuğlaların örülmesiyle elde edilen astar içindeki tamir olanakları, dökümle elde edilen tek parça astarda olduğundan daha zor ve daha pahalıdır. Böylece dökme refrakterle örülen astar, daha uzun çalışma ömrüne sahip olacağı için ekonomik olmaktadır. Ayrıca dökme refrakterler, çevreye olumsuz etkileri daha az olması bakımından da daha avantajlı olduğu görülmüştür [15]. 1991'deki ilk denemelerde; taban ve duvar malzemesi olarak andalusit esaslı döküm harcı ve cüruf bölgesi için tiksotrop magnezit harcı kullanılarak, astar dayanıklılığı, yaklaşık dolomit tuğla ile örülü potanın astar dayanıklılığına denk geldiği gözlenmiştir. Daha sonraları boksit esaslı yüksek alüminalı harçların kullanımı ve cüruf bölgesinde amaçlanan tamir olanaklarının kolay olması dökme pota astar dayanımının daha da artmasına neden olmuştur. Tasarıma yönelik malzemeye bağlı bu türlü değişim ve gelişmeler hem tasarım tekniğinin gelişmesine hem de bugün güvenli bir şekilde uygulanabilinen kurutma ve pişirme rejimlerinin elde edilmesine katkı sağlamıştır. Ancak tüm bu denemeler, bazik tuğla kullanımına karşı tam bir avantaj sağlayamamıştır [15]. Bu sebeple; bu çalışmanın önemli konularından biri yeni geliştirilmekte olan özellikle yüksek alüminalı ve magnezya-alümina-spinel dökme refrakterlerin, klasik bazik tuğla uygulamasına karşı avantaj ve dezavantajlarının belirlenmesine dönük araştırmaları kapsamaması olarak düşünülmüştür.

Bu çalışma genel olarak iki kısım olarak planlanmıştır. İlk aşama olarak, malzemenin davranış ve özellikleri dikkate alınarak işlem yapılan SEY ile Sıvı Çelik Pota Astarı Sistemi'nin, çalışma şartları içinde -konverterden sıvı çelik dökümü öncesi ve sonrası- termal, mekanik ve termo-mekanik davranışları simule edilerek incelenmesi amaçlanmıştır. Bazik esaslı potalarda yaygın kullanımı bulunan magnezit ve magnezit-karbon tuğla ile örülmüş aşınma astarlı sistemin yanı sıra yeni geliştirilmekte olan ve bu malzemelere alternatif olarak sunulan magnezya-alümina-spinel dökme refrakter astar malzemesinin uygunluğunun araştırılması amaçlanmıştır.

Bu bölüm çalışmada ayrıca, pota astar geometrisinin termo-mekanik özelliklere etkilerinin SEY ile incelenmesi de çalışmanın temel amaçlarından birisini oluşturmaktadır.

Çalışmanın ikinci kısmında ise magnezit (MgO), magnezit-karbon ($MgO-C$) ve magnezya-alümina-spinel ($MgO-Al_2O_3$ -spinel ya da MA-spinel) refrakterlerin mekanik, termo-mekanik ve kimyasal özellikleri deneysel olarak araştırılarak, pota astarı uygulamalarındaki performanslarının kıyaslamalı olarak değerlendirilmesi amaçlanmıştır.

Böylce; SEY ile elde edilen sonuçların, deneysel yolla elde edilen sonuçlarla birlikte değerlendirilme yolları araştırılacaktır.

Tezin kapsamı içinde öncelikle SEY'in temel prensiplerinin yanısıra, mekanik (gerilme-yerdeğiştirme vb.) ve sıcaklık (ısı iletimi/geçışı, sıcaklık gradyeni vb.) etkilerinin SEY ile hesaplanmasının teorik temelleri, uygulamalı örnekler verilerek anlatılacaktır. Daha sonra ise pota metalurjisi ve refrakterleri ile proses özellikleri ayrıntılı olarak açıklanacaktır.



Şekil 2.1 İki boyutlu gerilme-şekil değiştirme durumu [1, s 32]

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

$$\{f\} = [K] \{a\} \quad (2.1)$$

Burada; $[K]$, Rijitlik Matrisi, $\{a\}$, Düğüm Noktası Bilinmeyenleri (yer değiştirme, sıcaklık vb.), ve $\{f\}$ ise, Yük Vektörünü ifade etmektedir.

- 7) Gerilme ve şekil değiştirme gibi ikincil sonuçlar hesaplatılarak, işleme devam edilmektedir.
- 8) Elde edilen sonuçlar, grafik ortamda sergilenmekte ve doğruluğu, sebep-sonuç ilişkisine dayandırılarak, sınanmaktadır [1-3, 16-18].

Buraya kadar anlatılanlar oldukça öz olarak işlem adımlarını tanımlamaktadır. Sonraki bölümlerde, bu işlem adımları, daha geniş olarak açıklanmaya çalışılacaktır. Bu kapsamda; malzemenin davranış özellikleri, gerilme-şekil değiştirme arasındaki ilişki, malzemede ısı iletimi ve bunların SEY açısından değerlendirilmesi konuları ele alınmaktadır.

2.2 Malzemenin Elastik Davranışı

Yaygın olarak bilinen Hook Kanunu'na göre tek eksenli gerilme durumu, matematiksel olarak aşağıdaki gibi ifade edilmektedir :

$$\sigma_x = E \cdot \varepsilon_x \quad (2.2)$$

σ_x : Gerilme (N/m^2), E : Elastisite Modülü (N/m^2), ε_x : Şekil Değişirme ($\Delta l/l$ olarak da ifade edilmektedir. Eşitlik içinde ε değeri, % olarak yer alır) [19, s 7].

Herhangi bir elemanın yüzeyleri üzerine, düzgün yayılı σ_x , σ_y , σ_z normal gerilmelerinin etkidiği düşünülecek olursa, o zaman toplam şekil değişirme, şu şekilde ifade edilmektedir :

$$\begin{aligned} \varepsilon_x &= 1/E [\sigma_x - \nu(\sigma_y + \sigma_z)] \\ \varepsilon_y &= 1/E [\sigma_y - \nu(\sigma_x + \sigma_z)] \\ \varepsilon_z &= 1/E [\sigma_z - \nu(\sigma_x + \sigma_y)] \end{aligned} \quad (2.3)$$

Şekil değiştirmeler ve bunlara denk gelen küçük yer değiştirmeler, dış kuvvetlerin etkisinin niteliğini değiştirmeyecek boyutta kaldığı sürece, yukarıdaki bağıntılar, geçerliliğini korumaktadır. Böyle durumlarda, şekil değiştirmiş cismin boyutlarındaki küçük değişikliklerle, dış kuvvetlerin mevcut olduğu noktalardaki küçük yer değiştirmelerin etkisi ihmal edilebilir niteliktedir ve hesaplamalarda cismin başlangıç boyutları dikkate alınır. Böylece toplam (bileşke) yer değiştirme miktarları, 2.3 bağıntılarının elde edilişinde olduğu gibi, süperpoze¹ edilerek dış kuvvetlerin lineer fonksiyonları şeklinde ortaya çıkmaktadır [19, s 7].

Tüm bunların yanı sıra, yer değiştirmeler küçük de olsa dikkate alınmasının gerekli olduğu özel durumlar söz konusu olabilir. Bu durumda, artık dış kuvvetlerin lineer bir fonksiyonu yeterli olamayacağı için basit bir süperpozisyon ile olayı çözmek kolay olamamaktadır [19, s 8].

¹ Elastik cisim problemlerinin çözümü, diferansiyel denklemlerle sınır şartlarını sağlayan gerilme bileşenlerini veya yer değiştirmeleri belirlemeyi gerektirmektedir. Bunların denge denklemleri, uygunluk şartları ve sınır şartlarının bir arada düşünüldüğü denklem takımları ile ifade edilmesi [19]

Yukarıda verilen gerilme-şekil değiştirme arasındaki bağıntılar, E (elastisite modülü) ve ν (poisson sabiti) gibi fiziksel büyüklüklerle tam olarak tarif edilebileceğini ifade etmektedir, aynı sabitler, kayma gerilmesi ile kayma şekil değiştirmesi arasındaki bağıntıyı ifadede de kullanılabilmektedirler [19, s 8].

Şekil 2.2'de τ ile gösterilen kayma gerilmeleri, temel gerilmelere bağlı olarak aşağıdaki şekilde tanımlanmaktadır:

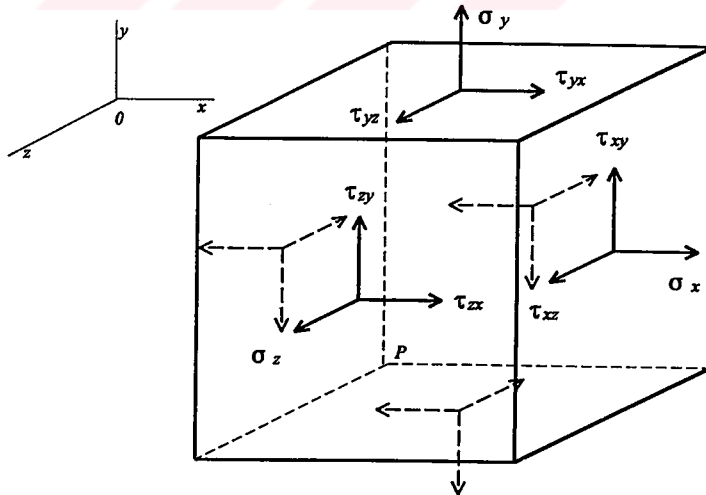
$$\tau = \frac{1}{2} (\sigma_x - \sigma_y) = \sigma_z \quad (2.4)$$

Bu ifedeye bağlı olarak gerekli açılımlar sağlandığında, kayma gerilmesi ile kayma şekil değiştirmesi arasındaki ilişki, E ve ν sabitleriyle ifade edilmiş olmaktadır. Kaymadaki elastisite modülü ya da rijitlik modülü,

$$G = E / 2(1 + \nu) \quad (2.5)$$

şeklinde tanımlanarak, kayma gerilmesi-kayma şekil değiştirmesi hesaplamalarına ilave olarak katılmaktadır. Kayma sonrası şekil değiştirme ise, Hook Kanunu'na göre, $\gamma = \tau/G$ olarak ifade edilmektedir [19, s 9]. Buna göre kayma modülüne bağlı olarak üç boyutlu durumda kayma şekil değiştirmeleri aşağıdaki verilmektedir.

$$\gamma_{xy} = (1/G) \tau_{xy}, \quad \gamma_{yz} = (1/G) \tau_{yz}, \quad \gamma_{zx} = (1/G) \tau_{zx}$$



Şekil 2.2 Üç boyutlu gerilme-şekil değiştirme durumunda temel gerilmeler ve kayma gerilmeleri [19, s 3]

2.3 Lineer Elastik Gerilme-Şekil Değişirme Özellikleri ve SEY'e Uyarlanması

SEY ile yapılan hesaplamalarda, elemanlara bölünmüş katı model içindeki her bir elemanın davranışının incelenmesi ve diğer komşu elemanların davranışlarına bağımlılığı gereği, yukarıda belirtilmiş olan olayların matrisler yardımıyla ifadesini gerektirmiştir. Çok genel olarak, üç boyutlu gerilme-şekil değişirme durumu :

$$\{\sigma\} = [D] \cdot \{\varepsilon\} \quad (2.6)$$

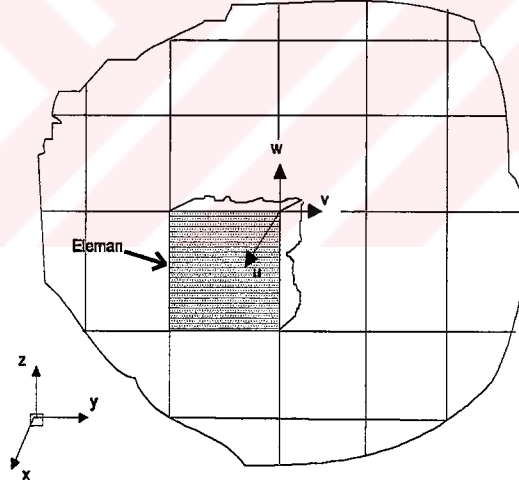
şeklinde ifade edilmektedir. Burada;

$$\{\sigma\} = \{\sigma_x \sigma_y \sigma_z \tau_{xy} \tau_{yz} \tau_{zx}\}^T \quad \text{'Gerilme Vektörü'}$$

$$\{\varepsilon\} = \{\varepsilon_x \varepsilon_y \varepsilon_z \gamma_{xy} \gamma_{yz} \gamma_{zx}\}^T \quad \text{'Şekil Değişirme Vektörü'}$$

$$[D], \quad \text{'Elastisite Matrisi'}$$

Elastisite matrisinin bileşenleri konusu, üç boyutlu durum için daha ileride detaylı olarak anlatılacaktır [1-3, 17].



Şekil 2.3 Eleman düğüm noktası yer değiştirmeleri (u, v, w) [1]

Elemanlardan birinin, herhangi bir düğüm noktasındaki bölgesel eksenlerdeki yer değiştirmeleri, Şekil 2.3'teki gibi u, v, w olarak ifade edilirse, yer değiştirme miktarları;

$$\varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x}; \quad \varepsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y}; \quad \varepsilon_z = \frac{\partial w}{\partial z}$$

olarak tanımlanmaktadır. Buradan hareketle kayma şekil değiştirmeleri için;

$$\gamma_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}$$

$$\gamma_{zx} = \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \quad (2.7)$$

$$\gamma_{yz} = \frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z}$$

tanımları yapılabilmektedir. u, v, w, şekil değiştirme bileşenleridir [1-3, 17].

SEY ile yapılacak hesaplamalarda, gerilme-şekil değiştirme durumu matrislerle ifade edilmesi gerekmektedir. Buna göre;

- Düzlem gerilme durumu için;

$$\sigma_z = 0, \quad \tau_{xz} = \tau_{yz} = 0 \text{ dir.}$$

Eşitlik 2.6 içindeki elastisite matrisi [D]' nin açık olarak yazılımı şu şekildedir:

$$[D] = E/(1-\nu^2) \begin{bmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & (1-\nu)/2 \end{bmatrix}$$

- Düzlem şekil değiştirme durumu için elastisite matrisi [D], aşağıdaki gibi düzenlenmektedir;

$$\alpha_1 = [E(1-\nu)]/[(1+\nu)(1-2\nu)]; \quad \alpha_2 = \nu/(1-\nu); \quad \alpha_3 = (1-2\nu)/[2(1-\nu)]$$

$$[D] = \alpha_1 \begin{bmatrix} 1 & \alpha_2 & \alpha_2 & 0 & 0 & 0 \\ & 1 & \alpha_2 & 0 & 0 & 0 \\ & & 1 & 0 & 0 & 0 \\ & & & \alpha_3 & 0 & 0 \\ \text{sim.} & & & & \alpha_3 & 0 \\ & & & & & \alpha_3 \end{bmatrix}$$

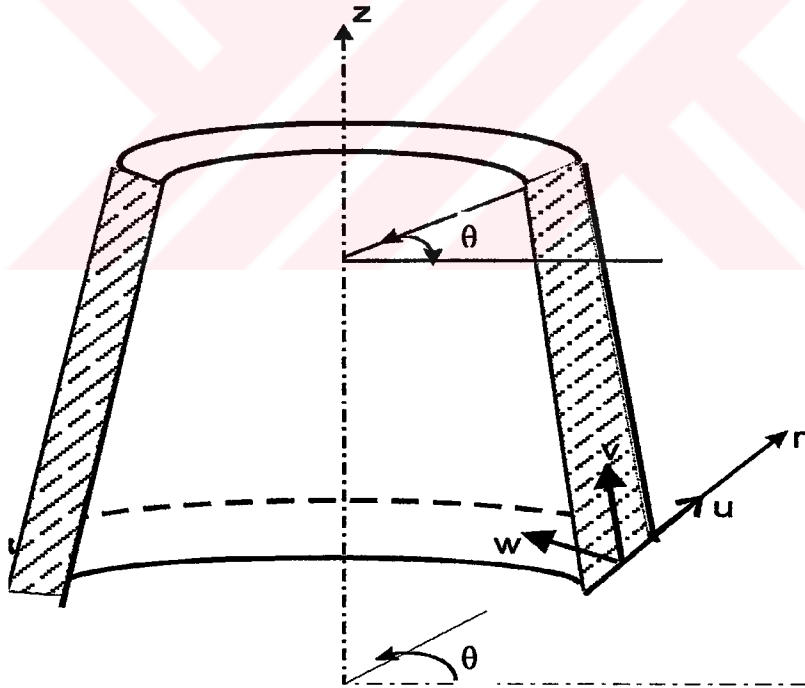
$$[D] = E/(1+\nu)(1-2\nu) \begin{bmatrix} (1-\nu) & \nu & 0 \\ \nu & (1-\nu) & 0 \\ 0 & 0 & (1-2\nu)/2 \end{bmatrix}$$

Oksijen Konverterleri, Çelik Potaları gibi aksel simetrik silindirik bir kabuğun (Şekil 2.4) herhangi bir elemanında meydana gelen şekil değişimleri ve yönleri Şekil 2.5'te görülmektedir. Şekil değişiminin z aksine göre simetrik olması, simetri kanunu gereği, gerilme bileşenlerinin θ açısından bağımsız olduğu ve θ 'ya göre alınan türev işleminin sıfır olduğu sonucunu ortaya çıkarmaktadır (Eşitlik 2.8). $\tau_{r\theta}$ ve $\tau_{\theta z}$ kayma gerilmesi bileşenleri de simetri nedeniyle etkisiz yani sıfırdır [1].

$$\frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial z} + (\sigma_r - \sigma_\theta)/r = 0 \quad \text{ve} \quad \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial r} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + \tau_{rz}/r = 0 \quad (2.8)$$

Şekil değişime bileşenleri, aksel simetrik şekil değişimleri için Eşitlik 2.9'daki gibidir:

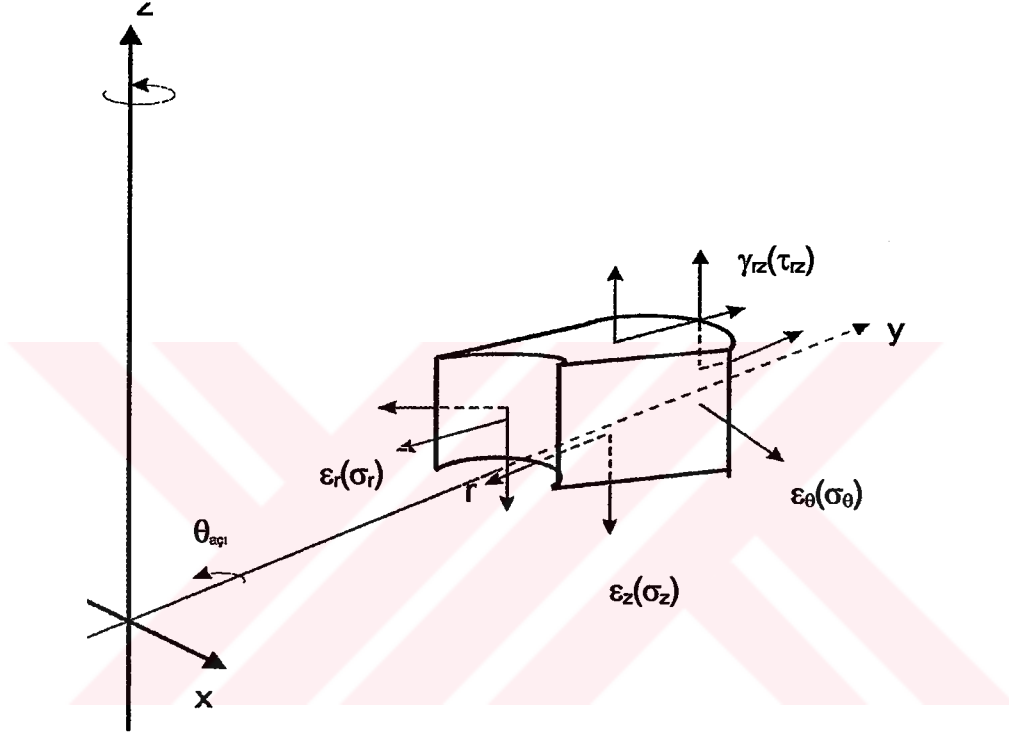
$$\begin{aligned} \epsilon_r &= \partial u / \partial r \\ \epsilon_\theta &= u / r \\ \epsilon_z &= \partial w / \partial z \\ \gamma_{rz} &= \partial u / \partial z + \partial w / \partial r \end{aligned} \quad (2.9)$$



Şekil 2.4 Aksel simetrik katı yapıda koordinatlar ve yer değişimleri [1, s 256]

Şekil değıştirme bileşenlerinin, matris olarak ifadesi aşağıdaki şekildedir :

$$\{\epsilon\} = \begin{bmatrix} \epsilon_r \\ \epsilon_z \\ \epsilon_\theta \\ \gamma_{rz} \\ \gamma_{r\theta} \\ \gamma_{z\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial u}{\partial r} \\ \frac{\partial v}{\partial z} \\ u/r + (1/r \cdot \frac{\partial w}{\partial \theta}) \\ \frac{\partial u}{\partial z} + (\frac{\partial v}{\partial r}) \\ (1/r \cdot \frac{\partial u}{\partial \theta}) + (\frac{\partial w}{\partial r} - w/r) \\ (1/r \cdot \frac{\partial v}{\partial \theta}) + \frac{\partial w}{\partial z} \end{bmatrix} \quad (2.10)$$



Şekil 2.5 Eksenel simetrik elemanda gerilme-şekil değıştirme durumu
[3, s 92]

Eksenel simetrik yapılarıdaki gerilme durumu için gerekli elastisite matrisi ise aşağıdaki şekilde düzenlenmektedir:

$$[D] = E / [(1+\nu)(1-2\nu)] \begin{bmatrix} (1-\nu) & \nu & 0 & 0 \\ \nu & (1-\nu) & \nu & 0 \\ 0 & \nu & (1-\nu) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & (1-2\nu)/2 \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

Daha önce de bahsedildiği gibi, SEY ile yapılan hesaplamalarda, katı ana yapı sonlu sayıdaki küçük bölgesel elemanlara bölünmektedir. Bu elemanlar, belirli sayıda düğümlerle birbirine bağlıdır. Elemanların her birinde meydana gelen düğümler arasındaki yer değıştirmeler interpolasyon yaklaşım metodlarıyla hesaplanmaya çalışılmaktadır. Bunun için şekil fonksiyonu ya da interpolasyon

fonksiyonu adı verilen bir parametrenin, hesaplamalara dahil edilmesi gerekmektedir. Buna göre;

$$\{f\} = \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum N_i u_i \\ \sum N_i v_i \\ \sum N_i w_i \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

buradaki u, v, w ; elemanın herhangi bir i düğümünde, bölgesel koordinatlardaki yer değiştirme miktarlarıdır. N_i , i düğümü için şekil fonksiyonunu ifade etmektedir. Düğümlerdeki bu yer değiştirmelere bağlı olarak, elemanda meydana gelen şekil değiştirmeler:

$$\{\epsilon\} = [B] \cdot \{\delta\} \quad (2.13)$$

olarak ifade edilir. Burada $[B]$, dönüştürme matrisidir ve içerisinde şekil fonksiyonuna bağlı ifadeler içermektedir. $\{\delta\}$, düğüm noktası yer değiştirmeleri matrisidir [1-3,17].

$$\{\delta\} = [u_1, v_1, w_1, u_2, v_2, w_2 \dots] \quad (2.14)$$

Bu matrislerin kullanımıyla birlikte, daha önce tanımlanan elastisite matrisinin $[D]$ de ilave edilmesi sonucu temel formül olan $\{\sigma\} = [D] \cdot \{\epsilon\}$ ' a ulaşılmaktadır [1-3,17].

Buraya kadar anlatıla gelen gerilme-şekil değiştirme ilişkisinde kullanılan tanımlar, diğer başka mühendislik problemlerinin (ısı iletimi/geçışı, akışkanlar mekaniği, manyetizma vb. gibi) SEY ile çözümündeki tanımlamalarına benzerlikler göstermektedir. Bu nedenle yukarıdaki temel formüle daha geniş anlamlar yükleyebilecek başka bir ifade tarzına gitmek gereği doğmaktadır. Eşitlik 2.1'de de belirtildiği gibi;

$$\{f\} = [K] \cdot \{a\} \quad (2.15)$$

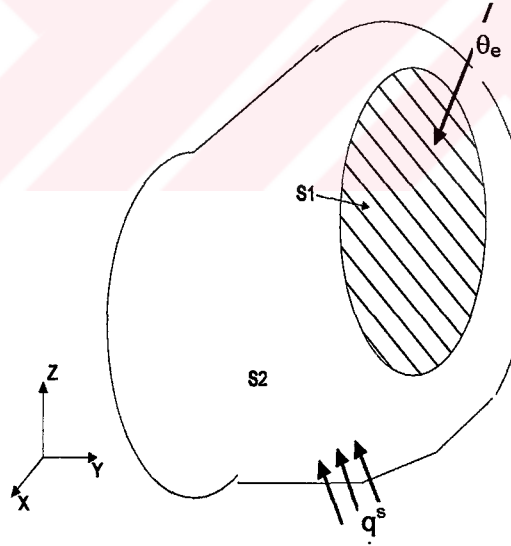
ifadesi içinde $\{f\}$, yük vektörünü, $[K]$, rijitlik matrisini ve $\{a\}$, düğüm noktası bilinmeyenlerini tanımlamaktadır [1-3,17,19-21].

2.4 Isı iletimi problemleri ve SEY'e uyarlanması

Isı iletimi ve kapsamı içine giren problemlerin fiziksel sonuçları bakımından birbirine çok benzeyen sıvı iletimi problemleri de dahil, SEY ile çözümü, son yıllarda oldukça önem kazanmıştır. Metalurji endüstrisinde de yüksek sıcaklık prosesleri ve bu proseslere dahil olan sistemlerin termal davranışlarının SEY ile analizi çalışmaları ve uygulamalarından, verimli sonuçlar elde edilmektedir. Özellikle refrakter malzeme seçimi, kullanımı ve termal, termo-mekanik davranışlarının incelenebilmesi, önemli tecrübelerin kazanılmasını sağlamıştır [2, 20-22].

SEY ile ısı iletkenliği problemlerinin çözümü için konuya, ısı iletkenliğini belirleyen bazı diferansiyel ve bilinmeyen denklemlerin neler olduğunu incelemekle başlamak yerinde olacaktır [2, s 447].

Şekil 2.6'da gösterilen üç boyutlu herhangi bir yapının ısı iletimi hesabı için, Fourier Kuralı'na uygun bir malzeme seçilmiştir [2]. Buna göre;



Şekil 2.6 Üç boyutlu bir katı yapıda ısı iletimi [2, s 448]

$$\begin{aligned} q_x &= -k_x (\partial\theta/\partial x) \\ q_y &= -k_y (\partial\theta/\partial y) \\ q_z &= -k_z (\partial\theta/\partial z) \end{aligned} \quad (2.16)$$

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

$$\frac{\partial}{\partial x} (k_x \frac{\partial \theta}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (k_y \frac{\partial \theta}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (k_z \frac{\partial \theta}{\partial z}) = -q^B \quad (2.17)$$

q^B , birim hacime düşen ısı miktarıdır [2, s 448].

Sınır şartı olarak malzemenin yüzeyinde mevcut koşulların belirlenmesi ve tanımlanması gereklidir [2, 17].

$$\theta \big|_{s_1} = \theta_e \quad (2.18)$$

$$k_n (\partial \theta / \partial n) \big|_{s_1} = q_s \quad (2.19)$$

Burada θ_e , dış ortam sıcaklığıdır. Malzeme üzerindeki sıcaklık, çevre sıcaklığı ile aynıdır. Bu, oda sıcaklığı olabildiği gibi, daha yüksek/düşük sıcaklıklar da olabilir. K_n , malzemenin ısı iletim katsayısıdır. n, yüzey normaline paralel yöndeki katsayıdır. q_s , yapının birim yüzeyine düşen ısı akımı değeridir. Görüldüğü gibi, ısı iletim özelliği dışında, malzemeye yönelik bilgilere gereksinim duyulmamış olması, önemli bir kolaylık sağlamaktadır. Eğer harekete başlamış bir ısı akımı içinde, ısı iletimi hesaplanacaksa, bu durumda Eşitlik 2.16'daki ortalama konvektif ısı iletimini ifade eden terim dikkate alınmalıdır. Bu terim, simetrik olmayan sabit bir matrisi tanımlamaktadır. Sayısal çözüm sırasında meydana gelebilecek kararsız durumlardan kaçınmak için, özellikle ısı iletimine olabildiğince dikkat edilmelidir [2, 17].

Isı iletiminin, gerilme-şekil değiştirme durumundan ayrı tutularak hesaplanması, yapısal bir çok malzeme için geçerli olabilse de, tümü için geçerli olamamaktadır. Örneğin; metallerin şekil değiştirme hesaplamaları, buna iyi bir örnek oluşturmaktadır. Zira metallerdeki faz dönüşümleri ve sadece termal davranışları değil, aynı zamanda mekanik davranışları da içermekte, böylece termo-mekanik etkiler söz konusu olmakta ve malzemenin mekanik özelliklerinin de dikkate alınması gereği

doğmaktadır. Bundan sonraki bölümde, sıcaklığa bağlı malzeme parametreleri ve özelliklerinin dikkate alındığı durum incelenmeye çalışılacaktır [2, s 449].

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

1. *Sıcaklıkla ilgili sınır şartları* : Eşitlik 2.18'de S_1 olarak tanımlanmış belirli bir yüzey ya da noktalardaki sıcaklıklar örnek olarak tanımlanabilir.
2. *Isı iletim şartları* : Belirli bir yüzey ya da noktalarda mevcut ısı akımı şeklinde ifade edilebilir. Eşitlik 2.19'da bu durum, matematiksel olarak verilmektedir.
3. *Konveksiyon sınır şartları* : Eşitlik 2.19, konvektif şartlara uygun olarak yeniden düzenlenecek olursa:

$$q^s = h(\theta_e - \theta^s) \quad (2.20)$$

elde edilir. Burada h , sıcaklığa bağımlı konveksiyon katsayısıdır.

4. *Radyasyon sınır şartları* : Aynı şekilde Eşitlik 2.19, bu defa radyasyon şartlarına göre yeniden düzenlenir.

$$q^s = k(\theta_r - \theta^s) \quad (2.21)$$

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

$$k = h_r[(\theta_r^2 + (\theta^s)^2)(\theta_r + \theta^s)] \quad (2.22)$$

h_r , değişken bir katsayıdır ve absorbe olan malzemelerin ve radyasyonun yarattığı emisyon ihtiyacını dikkate alan Stefan-Boltzmann sabitleri tarafından belirlenmektedir [2, s 449-450].

Sıcaklıkla ilgili olarak bu sınır şartlarının yanı sıra, zamana bağlı değişiklikler ve sıcaklığın başlangıçtaki etkileri, hesaplamalarda göz önüne alınması gereken şartlar içinde sayılmalıdır [2].

SEY ile problemlerin çözümünde, gerekli eleman denklemini kurmak için karmaşık diferansiyel denklemlerin kullanılması ve bunlara ait örnekler, Ek A'da anlatılmaktadır.

2.4.1 Isı iletimi eşitliklerinin SEY ile çözümünde sınıflandırma

Isı iletiminde kullanılan SEY çözümünün gerilme hesaplamasında kullanılan çözümle çok benzer olduğuna daha önce değinilmişti. Hesaplamalarda basitten karmaşığa doğru bir yol izlenerek, her adımda elde edilen tecrübelerin birikimi ve bundan yararlanılması oldukça önem taşımaktadır. Bu nedenle ilk olarak, zamana bağlı olmayan (zamanın fonksiyona bir değişken olarak girmediği durum) hesaplamalar gerçekleştirilmektedir. Zira bu çözüm, zamana bağlı çözüme göre daha az karmaşık olduğundan daha basittir. Bu şekilde SEY ile çözüm süreci, gruplandırılarak idealize edilmektedir [2, 17]. Gerilme hesaplamalarının analojisinde, m. eleman için ve $t+\Delta t$ zamanı içinde olay şu şekilde formüle edilmektedir :

$$\begin{aligned} {}^{t+\Delta t}\theta^{(m)} &= H^{(m)} \cdot {}^{t+\Delta t}\theta \\ {}^{t+\Delta t}\theta^s(m) &= H^s(m) \cdot {}^{t+\Delta t}\theta \\ {}^{t+\Delta t}\theta', (m) &= B^{(m)} \cdot {}^{t+\Delta t}\theta \end{aligned} \quad (2.23)$$

m, eleman sıralamasını temsil eden indekstir. ${}^{t+\Delta t}\theta$, $t+\Delta t$ zamanı içindeki, düğüm noktası sıcaklıkları vektörüdür [2, s 453].

$${}^{t+\Delta t}\theta^T = [{}^{t+\Delta t}\theta_1 + {}^{t+\Delta t}\theta_2 + \dots + {}^{t+\Delta t}\theta_n] \quad (2.24)$$

$H^{(m)}$ ve $B^{(m)}$ matrisleri, elemanın sıcaklığı ya da daha açık bir ifadeyle eleman sıcaklığı için interpolasyon matrisleri ve $H^s(m)$ matrisi, yüzey sıcaklığını belirten interpolasyon matrisidir. 2.23 eşitliğinin $t+\Delta t$ zamanındaki eleman sıcaklığı ve eleman-sıcaklık gradyanının hesaplanmasına ihtiyacı vardır. Bu interpolasyon matrisleri, herhangi bir zaman için sıcaklık durumunun ve sıcaklık gradyanlarının hesaplanmasında da kullanılabilirler [2, s 453].

2.4.1.1 Zamana bağılı olmayan durum

Eşitlik 2.23'ün lineer ısı iletimi hesaplamalarında ve SEY çözümünde kullanılabilmesi için aşağıdaki bazı bağıntıların sağlanması gerekmektedir, bu bağıntılarda kullanılan ifadelerden K^k ve K^c , sırasıyla ısı taşınım ve konveksiyon matrisleri olup [2, s 454-455], şu şekilde hesaplanmaktadır.:

$$(K^k + K^c) {}^{t+\Delta t}\theta = {}^{t+\Delta t}Q + {}^{t+\Delta t}Q^c \quad (2.25)$$

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

$$K^k = \sum_m \int_{V^{(m)}} B^{(m)T} \cdot k^{(m)} \cdot B^{(m)} \cdot dV^{(m)} \quad (2.26)$$

$$K^c = \sum_m \int_{S_c^{(m)}} h^{(m)T} \cdot H^{s(m)T} \cdot H^{s(m)} \cdot dS^{(m)} \quad (2.27)$$

$${}^{t+\Delta t}\theta_B = {}^{t+\Delta t}Q_B + {}^{t+\Delta t}Q_S + {}^{t+\Delta t}Q_C \quad (2.28)$$

taşınmış düğüm noktası ısı vektörü ve ${}^{t+\Delta t}Q_C$, konsantre olmuş, taşınmış düğüm noktası ısı iletimini temsil eden vektördür [2, s 455]. Bağıntı içindeki diğer terimler;

$${}^{t+\Delta t}Q_B = \sum_m \int_{V^{(m)}} H^{(m)T} \cdot {}^{t+\Delta t}q^{B(m)} \cdot dV^{(m)} \quad (2.29)$$

$${}^{t+\Delta t}Q_S = \sum_m \int_{S_c^{(m)}} H^{s(m)T} \cdot {}^{t+\Delta t}q^{S(m)} \cdot dS^{(m)} \quad (2.30)$$

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

Yukarıdaki karmaşık bağıntıların uygulamasına yönelik örnekler ve lineer olmayan durum için gereken bağıntıların kurulması, Ek B'de anlatılmaktadır.

2.4.1.2 Zamana bağılı olan durum

Daha önce kısmen belirtilmiş olduğu gibi, zamana bağılı ısı iletimi hesaplamasında, ısıyı depolama etkisinin, üretilmiş olan ısıнын bir bölümü olarak, hesaplamaların içine dahil edilmesi gereklidir. Bunun için Euler Denklemi kullanılarak, zamana bağılı olmayan durumu belirleyen eşitliklerin yardımıyla, direkt olarak ısı akımı için gereken denge şartları sağlanabilmektedir [2, s 458]. Bu denge örneğın m. eleman için;

$$\theta^{(m)}(x,y,z) = H^{(m)}(x,y,z) \theta'(t) \quad (2.31)$$

$${}^{t+\Delta t}Q_B = \sum_m \int_{V^{(m)}} H^{(m)T} ({}^{t+\Delta t}Q_B^{(m)} - {}^{t+\Delta t}C^{(m)} \cdot H^{(m)} {}^{t+\Delta t}\theta') dV^{(m)} \quad (2.32)$$

şeklindedir. Burada ${}^{t+\Delta t}q_B^{(m)}$, malzeme içinde depolanmış ısıyı tam olarak içerebilmektedir. Zamana bağılı şartlar altında bunu sağlamak ve ısı akım dengesini oluşturabilmek için, lineer hesaplamalar yapılırken SE-eşitlikleri şu şekilde kurulur :

$$C {}^{t+\Delta t}\theta' + (K^k + K^c) {}^{t+\Delta t}\theta = {}^{t+\Delta t}Q + {}^{t+\Delta t}Q_e \quad (2.33)$$

ve lineer olmayan hesaplamalar için ısı depolama etkilerinin lineerleştirilmesine başvurulmadan;

$${}^{t+\Delta t}C^{(i)} {}^{t+\Delta t}\theta^{(i)} + ({}^tK^k + {}^tK^c + {}^tK^r) \Delta\theta^{(i)} = {}^{t+\Delta t}Q + {}^{t+\Delta t}Q^{c(i-1)} + {}^{t+\Delta t}Q^{r(i-1)} + {}^{t+\Delta t}Q^{k(i-1)} \quad (2.34)$$

$$C = \sum_m \int_{V^{(m)}} H^{(m)T} C^{(m)} \cdot H^{(m)} \cdot dV^{(m)} \quad (2.35)$$

$${}^{t+\Delta t}C^{(i)} = \sum_m \int_{V^{(m)}} H^{(m)T} {}^{t+\Delta t}C^{(m)(i)} \cdot H^{(m)} \cdot dV^{(m)} \quad (2.36)$$

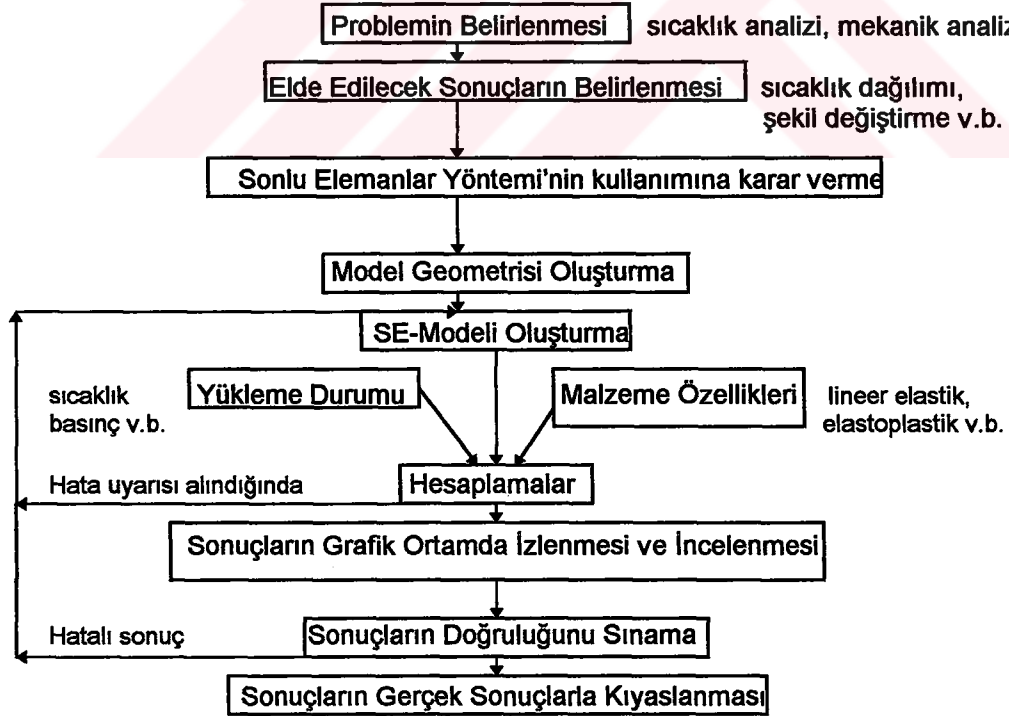
gerçekleştirilmektedir. C ve ${}^{t+\Delta t}C^{(i)}$, ısı kapasitesi matrisleridir [2, s 459].

Görüldüğü gibi karmaşık gözükken bu eşitlikler ve hesaplamalar, bugün artık bilgisayar teknolojisinin desteğiyle daha kolay uygulanabilir olmuşlardır. SEY içinde ısı iletimi gibi problemler, alan problemleri olarak adlandırılmaktadır. Isı iletimi hesaplamalarında kullanılan yukarıdaki tüm tanım ve ifadeler, aynı şekilde ve tamamıyla sıvıların iletimi için de geçerlidir. SEY için bu ayrımın pek bir önemi yoktur, aynı şekilde SEY'ne göre çalışan bilgisayar programları için de bu geçerlidir. Tablo 2.1'de bu durum genelleştirilmiş olarak özetlenmektedir [2, 17-18].

Tablo 2.1 Alan problemleri hesaplamalarındaki benzeşimler [2, s 460]

Problem	θ -değişkeni	k_x, k_y, k_z sabitleri	q_B	q_S
Isı İletimi	Sıcaklık	Isıl İletkenlik	I_{ϕ} Isı	Mevcut Isı Akımı
Sızan Akımlar	Toplam Basınç Yüksekliği	Geçirgenlik	I_{ϕ} Akımlar	Mevcut Akımlar
Torsiyon	Gerilim Foksiyonu	(Çekme Modülü) ⁻¹	(2)x(çevrim açısı)	—
Sürtünmesiz, Salınımsız, Akım	Potansiyel Fonksiyon		Kaynak	Mevcut Hız
Elektrik İletimi	Gerilim	Elektrik İletkenlik	I_{ϕ} sel Akımın Kaynakları	Mevcut Akım
Elektrostatik Alan Problemi	Alan Potansiyeli	Dielektrisite Katsayıları	Elektrik Yük Yoğunluğu	Mevcut Alan

SEY'e göre işlem yapan paket haline getirilmiş bilgisayar programları, bazı farklılıklarına karşın, temelde aynı mantık çerçevesinde çalışmaktadır. Böyle bir program kullanılarak yapılacak SEY analizleri için Şekil 2.7'de verilen şemadaki işlem akışına göre çalışma planı hazırlanmalıdır.

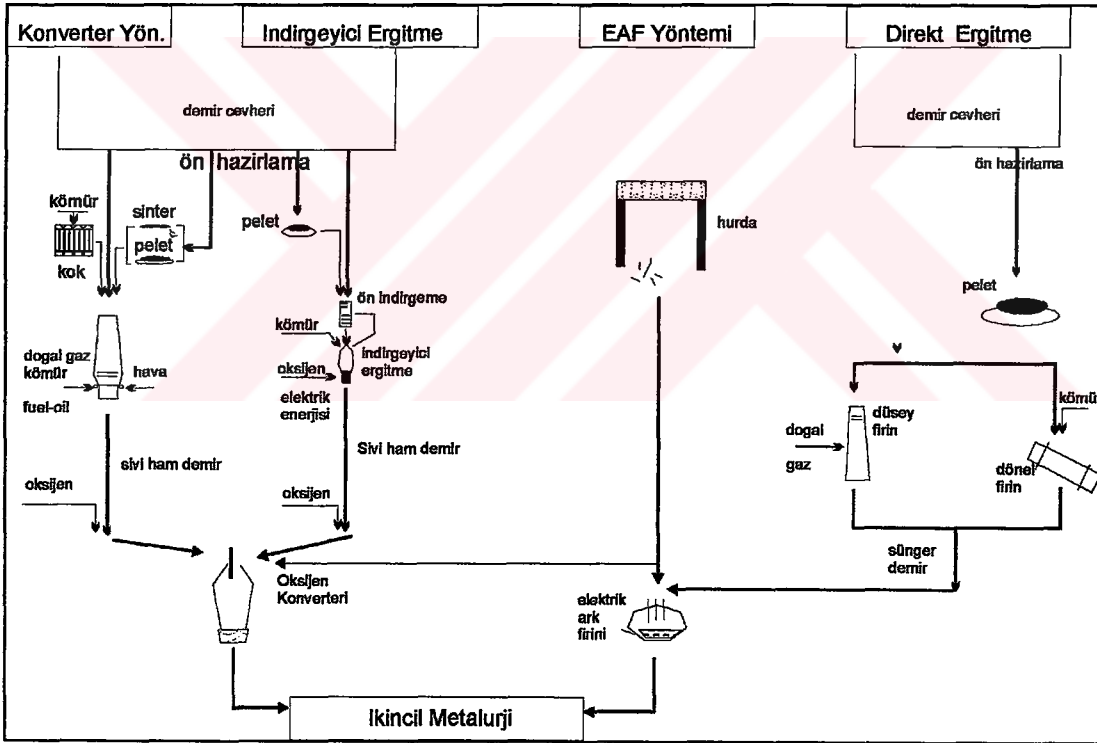


Şekil 2.7 SEY'e göre model hazırlama ve hesaplamaların işlem akım şeması

3 POTA METALURJİSİ, ÇELİK POTALARI ve REFRAKTERLERİ

3.1 Çelik Üretimi ve Pota Metalurjisi

Günümüz demir-çelik üretiminin çeşitli yöntemlerine ait genel akım şemaları Şekil 3.1'de görülmektedir. Cevherden yapılan birincil demir-çelik üretiminin büyük bir oranı, yüksek fırın ve konverter prosesi içeren entegre tesislerde gerçekleştirilmektedir. Bu entegre üretim tesislerinde; yüksek fırınlar, konverter-lerde çeliğe dönüştürülecek sıvı ham demiri üretmektedir [24].



Şekil 3.1 Çelik üretiminin farklı yöntemleri [24]

Geleneksel üretime alternatif olarak gösterilen, ancak kitle çelik üretiminde şu an için düşük seviyelerde kalan Direkt İndirgeme ve Sünger Demir uygulamalarını içeren bir başka üretim yöntemine ait işlem akım şeması, yine Şekil 3.1 içinde verilmektedir [24].

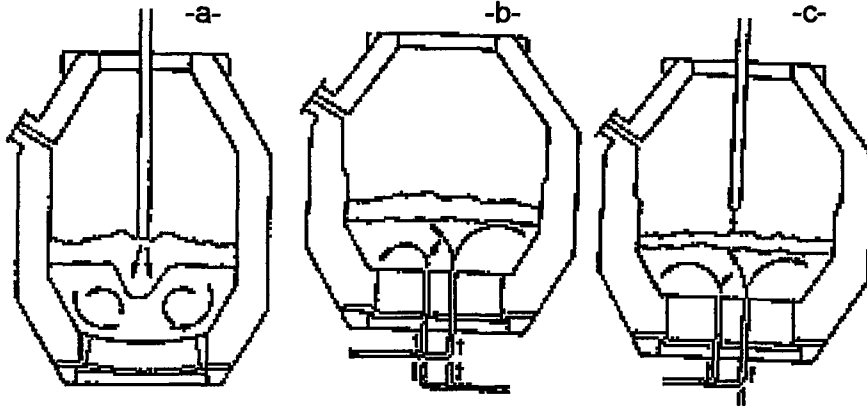
Bu uygulamalarda, demirli hammaddelerin katı halde doğrudan indirgenmesiyle üretilen sünger demir, elektrik ark fırınlarında (EAF), çelik hurdası ile birlikte ergitilmektedir. Geleneksel üretim olarak bilinen bu sistemde; yüksek fırınlar, prensip olarak demir oksitlerin (demirli hammaddelerin) demire indirgendiği, gangın cüruflaştırıcı ilaveleriyle sıvı cüruf halinde giderildiği, redüklenen demirin hammaddenin bileşimine ve işletme koşullarına bağlı olarak başta Si, Mn, P, S gibi elementlerin içerisinde çözündüğü ve karbonca doymuş sıvı ham demir olarak üretildiği büyük ünitelerdir [24].

Oksijenle çelik üretimi; sıvı ham demir, çelik hurdası ve cüruflaştırıcılardan oluşan konverter içerisindeki banyoya yüksek saflıktaki oksijenin yüksek basınçla üflenmesi şeklinde gerçekleştirilmektedir. Bu sayede özellikle sıvı ham demirdeki istenmeyen elementler giderilerek çelik bileşimine dönüştürülmektedir. Oksijen konverterleri için günümüzde endüstriyel kullanımı olan üç tip yöntem bulunmaktadır. Bunlardan biri, üstten oksijen üflemedir. Kısaca BOP denilen bu tipte oksijen sıvı banyoya üstten, özel nozulları bulunan bir boru veya lanslarla hızla püskürtülür (Şekil 3.2a). Bir diğeri, alttan üflemedir. Q-BOP denilen bu tipte; oksijen, konverterin tabanındaki tüyerelemlerden üflenmektedir (Şekil 3.2b). Bu iki tipin dışındakiler, bu iki özelliği tek bir sistemde beraberce uygulayan birleştirilmiş üfleme teknikleri olarak tanımlanan tipler olup, değişik ticari isimlerle adlandırılmaktadırlar (Şekil 3.c) [24].

Oksijen konverterlerinde uygulama geliştirme çalışmaları sayesinde daha yüksek oranda hurda ve sünger demir kullanıma olanakları artmaktadır. Konvertere önce hurda şarjı yapılır. Daha sonra yüksek fırından gelen sıvı ham demir şarj edilerek oksijen üflenmesine başlanır. Oksijen konverterinde çeliğe dönüştürülecek sıvı ham demirin içeriğinde bulunan; özellikle C, Si, Mn, S ve P elementlerinin miktarları önemlidir [24].

Konverterlerde proses gereği, üretimin her safhasında, tuğla astar değişik şartların etkisi altında kalır. Astar üzerindeki bu değişik şartların da, tuğlayı aşındırması farklı olmaktadır. Konverterin çeşitli pozisyonlarında, tuğla astarı değişik etkilere maruz kalmaktadır ve değişik oranlarda aşınmaktadır. Tüm bu durumlar göz önünde tutularak bugün genel olarak konverterlerde çalışma astarı olarak, katran bağlı

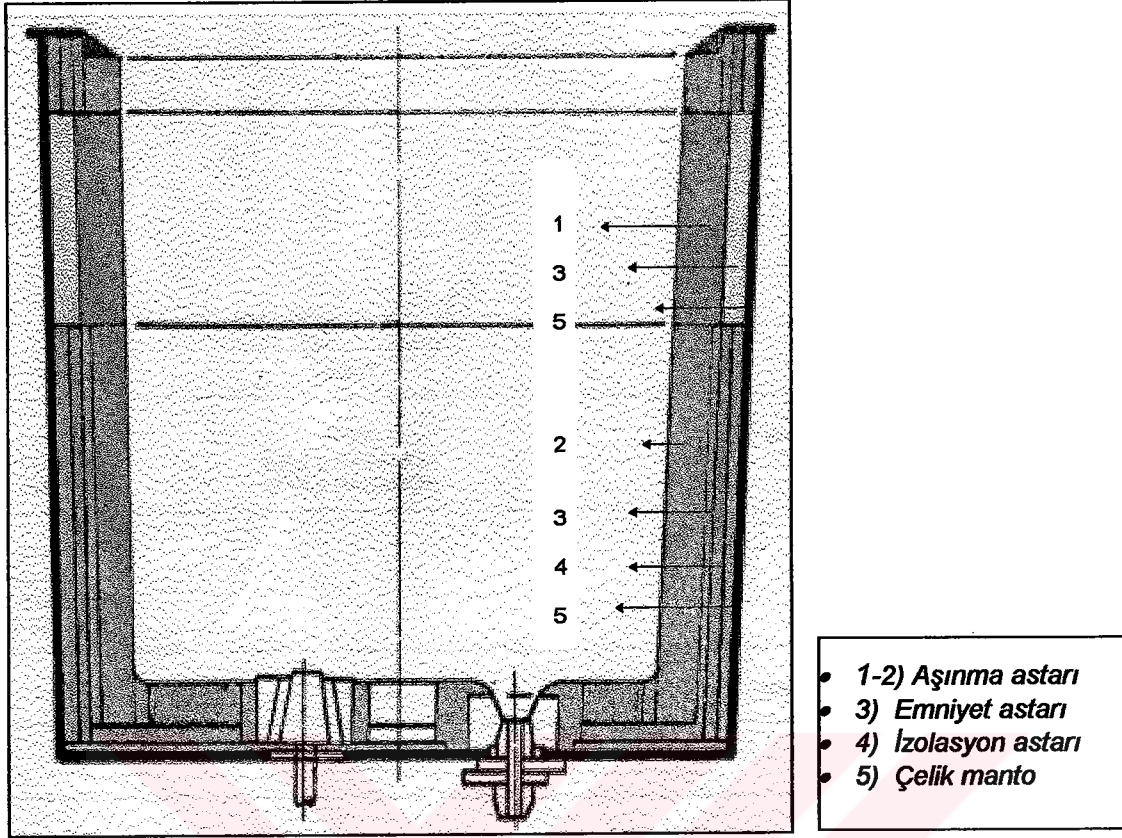
pişmemiş veya katran emdirilmiş pişmiş magnezit ya da dolomit tuğla, emniyet astarı olarak, pişmiş magnezit tuğla kullanılmaktadır [24].



Şekil 3.2 Çeşitli oksijen konverterleri (a : üstten üfleme, b : alttan üfleme, c : üstten-alttan üfleme) [25]

Şekil 3.1'deki şemadan görülebileceği gibi, hurda ergitme ve direkt indirgenmiş cevher ergitme yöntemlerinde kullanılan EAF'ları, günümüzdeki modern uygulama teknikleri ile birlikte küçük çaptaki çelik üreticilerinin tercih ettikleri bir prosestir. Hammadde olarak hurda ve sünger demir kullanılmaktadır. Bazı karakterli refrakter astar dizaynına sahip EAF'ı günümüzde daha yaygın olarak kullanılmaktadır. Bazı astarlamada genelde, magnezit esaslı refrakterler kullanılmaktadır. Aşınmanın en yoğun olduğu cüruf seviyesinde, %96-98 MgO içeren zift emdirilmiş tuğlalar kullanılmaktadır. Cüruf seviyesi ile soğutma panelleri arasındaki bölgede termal şoka dayanıklı %7-18 C içeren magnezit karbon refrakterler tercih edilmektedir. Cüruf seviyesi bitimiyle fırının ağız kısmı arasında ise pişmiş krom-magnezit tuğlaları örülmektedir [24].

Birincil üretim adı da verilen, ikincil üretim yani pota metalurjisi ve devamına geçmeden önceki adımı tanımlamak için kullanılan bu aşamaya ait gerek cevherden metale entegre çalışan bir işletme ve gerekse hurda-sünger demir işleyen küçük işletmelerdeki işlem akışı kısaca anlatılmaya çalışılmıştır. Bu aşamadan sonra ikincil metalurji adı verilen pota metalurjisi olarak da bilinen aşama yer almaktadır [24].



Şekil 3.3 Sıvı çelik döküm potası [26-27]

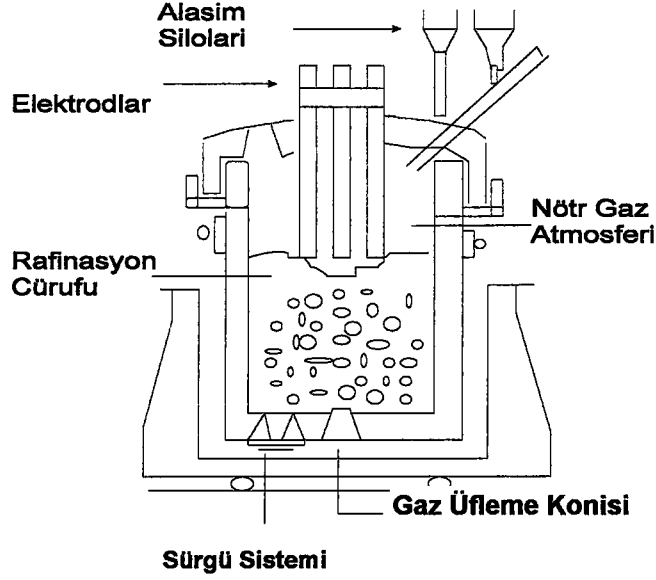
Potalar, yüksek fırın ve konverter prosesleri ile çalışan işletmelerde ya da EAF kullanılan işletmelerde, genellikle ergimiş metal üzerinde işlem yapılmasında kullanılmaktadır. Deoksidasyon, kükürt giderme, ısıtma ve homojenleştirme bu gibi işlemlere örnek oluşturmaktadır (Şekil 3.3). Bu işlemlerin EAF dışına kaydırılması sonucu, EAF'nın sadece ergitme fırını haline dönüştürülmesi, en başta kapasitenin çok miktarda artmasına neden olmuştur. Buna ilave olarak, sağladığı avantajlar, şu şekilde sıralanabilir :

- EAF'dan döküm alma sıcaklığı, 70-80°C düşürülebilmektedir.
- Çok düşük FeO, MnO içeren sentetik cüruflla çalışıldığında ve dipten argon gazı ile karıştırma nedeniyle çok hızlı ve etkili kükürt giderme sonucu, düşük kükürt içeren çelik üretilebilmektedir.
- Asal gazlarla karıştırma olanakları, kimyasal bileşim ve sıcaklık homojenitesi sağlamaktadır. Ayrıca metalik olmayan kalıntıların yüzdürülmesiyle daha temiz çelik üretilebilmektedir. Bunun için proses kontrol şartları, kolaylıkla sağlanabilmektedir.

- Potalar, EAF ve sürekli döküm arasında tampon görevi yaparak, işletme organizasyonunun daha kolay yapılmasını sağlamaktadır [28].

Sıvı ham demir ve sıvı çelik üretim fırınları dışında yapılan kaliteyi ve üretimi arttırıcı ilave işlemler, pota metalurjisinin kapsamı içine girmektedir. Yüksek fırın dışında en önemli pota metalurjisi işlemi, sıcak metalde kükürt, fosfor, silisyum giderme işlemidir. Bilindiği gibi demir-çelik üretim prosesleri içinde redükleyici ortamda bazik cüruflla en iyi kükürt giderme verimi yüksek fırında sağlanmaktadır. Ancak bu yöntemle çalışmanın refrakter ve kok tüketimi yanında şarjdaki alkalilerin problemlere yol açması nedeniyle, yüksek fırında olabildiğince asidik cüruflla çalışıp, kükürdü yüksek fırın dışında pota metalurjisi yöntemleriyle gidermek daha ekonomik olmaktadır [28].

Günümüz pota metalurjisi uygulamaları, ticari anlamda ilk olarak 1950'li yıllardaki vakum tekniklerinin adaptasyonu ile başlamıştır. Çelik üretiminde vakum uygulamaları, aslında sıvı çelik banyosu üzerindeki gaz atmosferinin basıncını ve dolayısıyla özellikle hidrojen gibi gaz yapıcı maddelerin kısmi basıncının azaltılmasıyla sonuçta, çelik içinde kalacak olan hidrojen miktarının çok düşük seviyelerde olmasını temin etmektedir. Sürekli dökümün henüz çok gelişmediği ilk dönemlerde uygulanan vakum prosesleri, vakum altında ingot dökümü, sıvı çeliğin potadan potaya vakum altında akışı, fırından sıvı çeliğin vakum altında potaya alınışı gibi teknikler şeklinde gelişmiştir. 1955-1958 yılları arasında, vakum tekniğinin temel prensibinden hareket ederek, potadaki sıvı çelik içine, dipten gözenekli tapa sistemleri veya üstten lanslarla inert gaz gönderilerek; sıvı çeliğin kimyasal bileşim ve sıcaklığını homojenleştirme, inklüzyon yüzdürme gibi yarar sağlayan bazı sistemler kullanılmıştır [28].



Şekil 3.4 Pota fırını [28]

Daha sonraki 1963-65'li yıllarda vakum ısıtma ve vakumda indüksiyon akımı ile karıştırma yöntemleri uygula-maya konulmuştur. Böylece birincil ergitme ünitelerinde aşırı ısıtmaya gerek kalmak-sızın verimli üretim olanağı ortaya çıkarılmıştır [28].

1970'li yıllarda sıvı çeliğe pota içerisinde katı madde enjeksiyonu gündeme gel-miş, özel alaşımlandırma ve deoksidasyon için tel alüminyum ilavesi yöntemleri geliştirilmiştir [28].

1980'lerin en yaygın yöntemi ise, pota fırını olmuştur. Pota fırınları, ilk ergitme dışında sıcaklık ayarlaması yapılabilen, sentetik cüruf ile kükürt giderilebilen, hassas alaşımlandırma ve deoksidasyona cevap veren, gaz karıştırma yöntemiyle sıcaklık ve bileşim homojenizasyonu sağlayan, kalıntılardan arındırılmış, sıvı çelik üretimini mümkün kılan tekniklerle donatılmıştır. Bu sistem, sürekli döküm tesisiyle uyumludur. Şekil 3.4'te pota fırını şematik olarak gösterilmektedir [28].

Modern anlamdaki bu pota fırını uygulamalarını kendi içinde üç grupta toplamak mümkündür.

- 1) İşlerinde alaşım yapılabilen, toz enjeksiyonuyla çeliğin saflaştırılabildiği, asal gazlarla sıcak tutulabilen ve sonra sürekli döküme gönderilen, döküm potaları.
- 2) Genel olarak pota fırını diye adlandırılan ve elektrik arkı ile çeliğin ısıtılabilirdiği pota tipleri (Finkl-Mohr, ASEA-SKF, Safe-Heurtey/Vacmetal) ve VAD (Vacuum Arc Degasmos) kısaltmasıyla bilinen, vakumlu ortamda ark ısıtmasıyla gaz çıkartmaya yarayan pota tipi.
- 3) VOD (Vacuum Oxygen Decarburization) potaları. Bu gruba VAD ile VOD'un kombine olarak kullanıldığı vakumlu ortamda argon üfleme yoluyla gaz çıkartma metodu da eklenebilir [27].

Çeliğin pota teknolojisi uygulaması sırasında kullanılan potalarda; yüksek döküm sıcaklıkları ve işlem sıcaklıkları oluşmakta, bu nedenle cüruf-refrakter arasındaki kimyasal reaksiyon (korozyon) artmakta, döküm alma ve gaz enjeksiyonu sırasında aşınma daha fazla olmaktadır. Bunlardan daha başka, refrakter malzemelerde önemli aşındırmalar oluşturan termal şoklar meydana gelmektedir. Tüm bu etkenler doğal olarak kullanılan refrakter malzemelerin, daha da geliştirilmesini talep etmektedir [27].

3.2 Çelik Potaları Refrakterleri, Gelişimi ve Çalışma Şartları

Çelik üretim yöntemlerinin çeşitli nedenlerle evrime uğraması sonucunda kullanılan potaların çalışma şartları ve dolayısıyla refrakter çeşitleri de değişmiştir. Pota refrakterlerinin çeşitlerini incelemeyden önce evrim içinde refrakterlerdeki değişimin ve pota çalışma şartlarının beraberce ele alınması yararlı olacaktır [29].

Siemens-Martin ocaklarının etkin olduğu dönemde fırından 10-12 saat aralıklarla çelik alınır, çok sayıda pota bulundurma ihtiyacı söz konusu olmazdı. BOF yöntemiyle, çelik alma çevrimi Siemens-Martin ocaklarına göre, 1/10 oranına gerilemiştir. Böylece daha çok sayıda pota ihtiyacı doğmuş, sermaye gereksinimi artmış, alternatif olarak uzun ömürlü veya daha çabuk yenilenebilen refrakter astar sistemleri gündeme gelmiştir. Daha sonraları, sürgülü sistemler, sürekli döküm ve

vakumda gaz giderme işlemleri uygulamaya girmiş, yüksek çelik sıcaklıkları, çeliğin potada kalış süresinin uzaması sonucunda pota astarlarının daha uzun süreler için daha yüksek sıcaklığa dayanması gereksinimi doğmuştur. Tüm bunlara ilave olarak; dekarbürizasyon, alaşımlama işlemleri ve cürufun bazikleşmesi de eklendiğinde pota refrakterlerinin aşınma boyutlarının artacağı kolayca anlaşılabilir [29].

Siemens-Martin Yöntemi'nin hakim olduğu dönemlerde çok kullanılan şamot tuğlalarda yüksek hacim ağırlığı, kullanım sıcaklığında genleşebilme, boyut ve şekil hassasiyeti temel özellikler olmuştur. Ateşkili tuğla %28-40 Al_2O_3 içermektedir. Daha sonraları yüksek Al_2O_3 'lü andalusit esaslı tuğlalar geliştirilmiş, ancak ekonomik olmadığı için kullanılamamıştır [29].

BOF döneminde ise iki döküm arası 30-60 dakikaya düşmüştür. Böylece pota çevrimi hızlanmıştır. Yani pota astarı çevrimler arasında sıcak kalmaya başlamıştır. Pota sayısının minimumda tutulması için ya pota ömrünün artması ya da örüm süresinin azalması veya tercihen her ikisinin de gerçekleştirilmesi gerekli olmuştur. Bu durumda pota ömrünün uzamaması göz ardı edilerek, yan duvarlarda kum-slinger metodu, tabanda ise kuru örüm olanağı veren fosfat bağlı pişmemiş silika tuğlalar uygulamaya sokulmuştur. Kum-slinger ekipmanının pahalı olması dolayısıyla şamot ve sömi-silika tuğlaların kullanılmasına da devam edilmiştir [29].

Sürekli Döküm Yöntemi'nin uygulamaya konulmasıyla, çeliğin potaya geliş sıcaklığının artması, potadaki kalış süresinin uzaması, silimanit ve mullit esaslı yüksek Al_2O_3 'lü tuğlaların kullanımını getirmiştir. Bu tür tuğlalarda da düşük porozite, çalışma sıcaklığında genleşme veya minimum küçülme arzulanan özelliklerin başında gelmektedir. Pota metalurjisi şartları da yüksek alüminalı refrakter uygulamasını gerektirmiş, maliyet unsuru ve uzun ömürlü olmaları potalarda kullanımını arttırmıştır. Özellikle monolitik astarlama tesisi bulunan ünitelerde tuğla örümü yerine bazik monolitik kullanımı tercih edilmiştir. Astarlamada bazik ürünlerin tercihinde çeliğe uygulanan sonuç işlemlerinin yanısıra sıvı çelikte refrakter arasındaki reaksiyonun minimize edilmesi, cüruf veya çelikteki FeO miktarının artışı etkin olmuştur. Cüruftaki FeO'nin artması; dolomitten magnezite, etkin termal şok şartları ve cüruftaki CaO/SiO_2 oranının düşmesi; magnezitten magnezit-kroma geçişin nedeni olmuştur. Bu tür malzemelerin dışında, ikincil çelik üretim potalarında; Japonya'da, magnezit-karbon, spinel-karbon, alümina-karbon

refrakterler ve ABD'de; reçine bağlı dolomit ve kimyasal bağlı magnezit-krom refrakterler uygulanmaktadır [29].

Refrakter örme tekniği olarak tuğla örme ve monolitik astarlama (dövme, slinger, vibrasyonlu ve dökme) yöntemleri uygulanmaktadır. Refrakter seçiminde dikkate alınacak hususlar şu şekilde sıralanabilir :

- 1) Metalurjik açıdan gerekli arındırma sonuçlarına ulaşabilmek için standart bir yönteme izin vererek, çelikte düşük gaz, düşük kükürt, düşük fosfor ve metalik olmayan kalıntıların minimum olması şartlarını sağlamaya izin vermelidir.
- 2) Refrakterlik bakımından yeterli olmalıdır. Farklı cüruflara, döküm sıcaklıklarına ve sıcak çelik çarpmalarına vs. dayanıklı olmalıdır.
- 3) Bekletmelere ve tamirlere uygunluk göstermelidir [29].

3.3 Çelik Döküm Potalarında Kullanılan Bazik ve Spinel Refrakterler

3.3.1 Bazik refrakterler

Bazik özellik taşıyan ve geniş kullanım alanı olan refrakter malzemeler; magnezit, magnezit-krom, dolomit ve magnezit-spineller olarak sıralanabilmektedir [30, s 230].

Magnezit hammadde kaynakları tüm dünyada yaklaşık 5 milyar ton ile doğal magnezit yatakları ve çok büyük bir kaynak olarak deniz suyu sayılmaktadır [30, s 231].

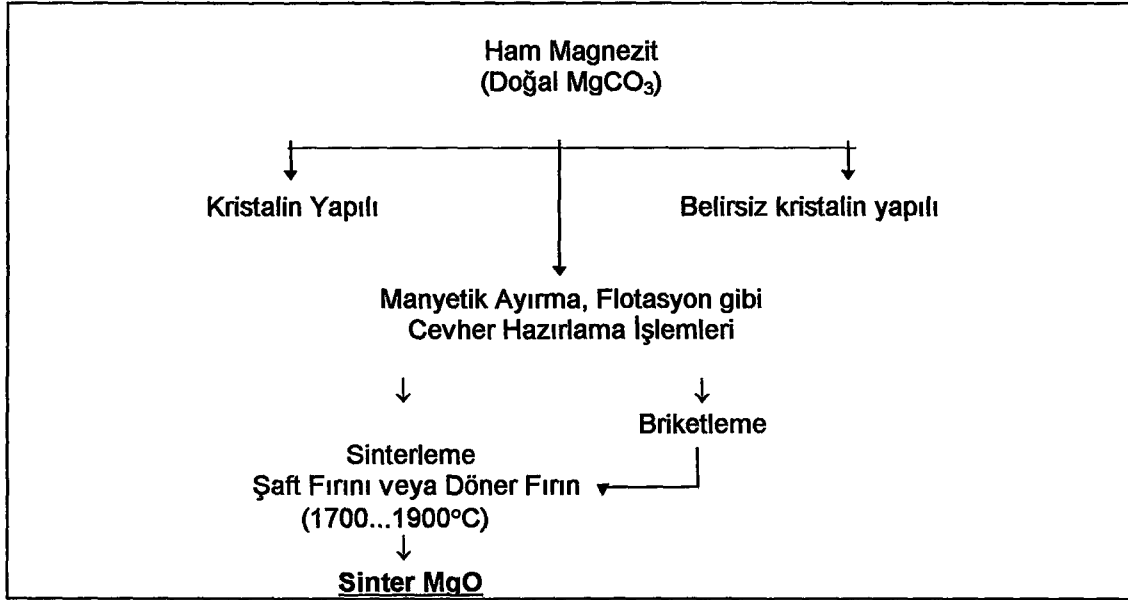
Refrakter magnezit (MgO) üretiminin hammaddesel temelleri; 1) Doğal kazanımla, hammadde kaynaklarında bulunduğu şekliyle, magnezit cevherinden ($MgCO_3$), 2) Sentetik kazanımla, büyük oranda deniz suyundan olmaktadır. Refrakter endüstrisinin sinter-MgO ihtiyacı, yaklaşık olarak %67 oranında doğal hammadde kaynakları olan magnezit cevherinden, geri kalan %33'ü ise sentetik olarak sağlanmaktadır. Sentetik üretimin ise $\approx$ %70'i deniz suyundan, diğer %30'u MgO

bazlı tuz çözeltilerinden oluşmaktadır. Gelecek yıllar, bu rakamların değişmesine neden olabilecek gelişmelere açıktır [30, s 232].

Refrakter magnezitin hammadde kaynağı yukarıda da söylendiği şekliyle, doğal $MgCO_3$ cevher yataklarıdır. Magnezit cevheri ise iki gruba ayrılabilir. Bunlardan birincisi, kristalin yapılı magnezit tipidir, ikincisi ise amorf olmamasına rağmen kristal yapısı tam belli olmayan, belirsiz kristalin yapılı magnezit tipidir. Kristal yapılı ham MgO , yıllardır refrakter malzemeler için temel hammadde olmuştur. Bu hammadde tipinin kristal yapısı, mikroskopik boyutta oldukça kaba kristalli tek kristaller olarak tanımlanabilir. $MgCO_3$ yataklarında, yan mineraller de bulunmaktadır. Bunlar, Ca ve Si içeren bileşiklerdir. Çok saf ham magnezit içeren hammadde içinde, dolomit ve kalsitli silikat inklüzyonları bulunmaktadır. Yüksek Fe içeriği de sıkça görülen bir durumdur. Öyle ki; Fe atomları, MgO 'in atom kafes yapısı içinde yer almaktadır [30, s 233].

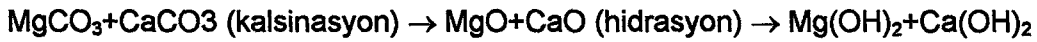
Kristal yapısı belirsiz ham magnezitin mikroskopik görüntüsü, küçük kırıklar içeren oldukça yoğun bir faz yapısı sergilemektedir. Çok az demir içeriği de bu faz yapısına dahildir. Bulunduğu yerdeki oluşumu muhtemelen metamorf-metasomatik olarak gerçekleştirmiştir. Karbon asitinin de bulunmasıyla, büyük bir ihtimal olarak serpantin ya da buna yakın bir mineralden meydana geldiği söylenebilir. Inklüzyonlar şeklinde silikat ve dolomit temelli maddeler, hammadde yapısı içinde mevcuttur [30, s 234].

Son yıllarda kimyasal açıdan daha saf malzeme kullanım gereksiniminin artması, sinter- MgO üretiminde yabancı maddelerin ayırma/ayırıştırma işlemlerinin de artmasını gerektirmiştir. Kristal yapılı hammaddeleri mekanik cevher hazırlama işlemleriyle, hammadde içindeki silikat ve karbonat oranını belli seviyelere indirmek mümkün olmaktadır. Bunu, ağır sıvı ile ayırma yöntemleri, güçlü manyetik ayırıcılar ve flotasyon yöntemleri izlemektedir. Şekil 3.5'te ise, doğal hammaddelerden sinter- MgO üretim akım şeması verilmektedir [30, s 234].

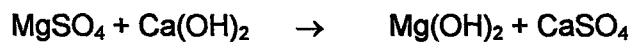
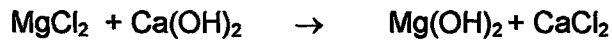


Şekil 3.5 Doğal magnezitten sinter-MgO üretim akım şeması [30, s 235]

Ham magnezitin kazanımı ve cevher hazırlanması sonrası termik işlemlere geçilmektedir. İnce öğütülmüş hammaddeler, önceden briktlenmektedir. Ham magnezitin pişirilmesi sırasında $\sim 550^{\circ}\text{C}$ 'de $\text{MgCO}_3 \rightarrow \text{MgO} + \text{CO}_2$ reaksiyonu sonucu kalsine olmaktadır. Burada oluşan MgO, aktiftir ve eğilimi, hidrate olarak $\text{Mg}(\text{OH})_2$ şekline dönmektir. Bu nedenle aktif MgO'nin inaktif hale getirilmesi daha uzun sinter sıcaklığı ve zamanı gerektirir. Sinter sıcaklığı, genel olarak $1700\text{--}1800^{\circ}\text{C}$ 'de bulunmaktadır [30, s 234].



Günümüzde uygulaması yaygınlaşan sentetik sinter-MgO kazanım yöntemlerinden en önemlisi, deniz suyundan elde edilenidir. Şekil 3.6'da deniz suyundan sinter-MgO kazanımı, şematik olarak gösterilmektedir. Kazanımın temel prensibi, aşağıdaki kimyasal reaksiyonlarla izah edilmektedir :



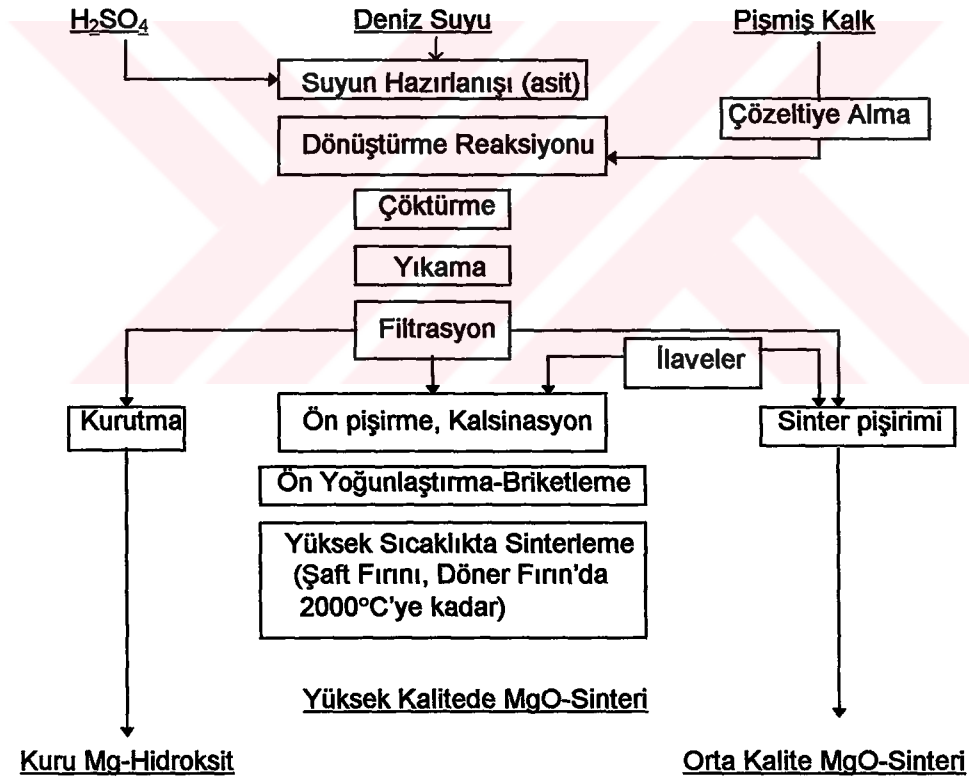
Çöktürülen $\text{Mg}(\text{OH})_2$, daha sonra yıkanarak, bünyesindeki Ca^{++} iyonları uzaklaştırılmaktadır. $\text{Mg}(\text{OH})_2$, genellikle vakum filtrasyon sistemi içinde filtreden

geçirilmektedir. Oluşan filtre kekinden, toz $Mg(OH)_2$ üretilmektedir. Bunu, sinter-MgO oluşturma işlemi takip etmektedir [30, s 238].

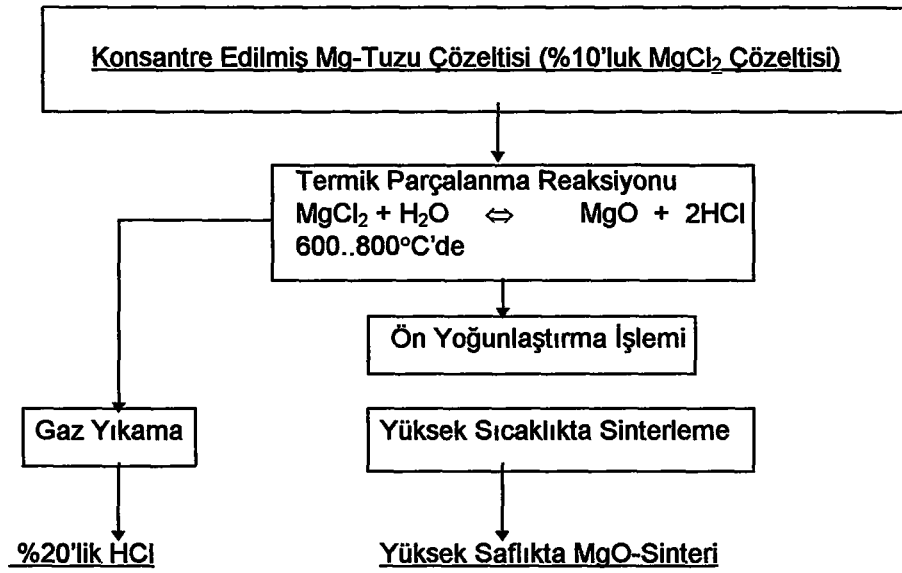
Sentetik üretimin bir başka yolu ise, Mg-tuzlarından sağlanmaktadır ve büyük oranda $MgCl_2$ tuzlarından yapılmaktadır. Göl gibi su yatakları, yüksek oranda $MgCl_2$ içeren kaynaklardan biridir. Bu tuz çözeltisi, 600-800°C'ye kadar su buharı altında reaktörlerde termik olarak parçalanmaktadır:



Termik yolla $MgCl_2$ 'ün parçalanmasıyla sinter-MgO üretimi, Şekil 3.7'de verilmektedir [30].



Şekil 3.6 Deniz suyundan sinter-MgO üretim akım şeması [30, s 239]



Şekil 3.7 Termik parçalanma yoluyla MgCl₂'den MgO-sinter üretim akım şeması [30, s 241]

Daha yüksek kalitede magnezit üretimi, sinter-MgO'nin bazı işlemlerden geçirilmesiyle sağlanabilmektedir. Ergimiş (fused) magnezit adı verilen bu türün üretimi sırasında, sinter-MgO 2000°C'nin üzerinde ergitilmektedir. Genellikle elektrik enerjisi kullanılarak yapılan bu işlemle, magnezitin reaktivitesi ve yoğunluğu arttırılmakta, dolayısıyla porozitesi düşürülmektedir [30, s 241].

Magnezit refrakterler, modern çelik üretiminin en önemli girdisi olarak tercih edilmektedir. Birçok hammadde türleri ve farklı üretim yöntemlerinin uygulanabilirliği ile EAF, bazik oksijen konverterleri ve pota metalurjisi proseslerinin en çok tercih ettiği refrakter çeşidi olmasını sağlamıştır. Bunu sağlayan en önemli neden; kalitesindeki gelişmelerdir. Bu gelişmelerin başında magnezite karbon ilavesi gelmektedir. Karbonun, magnezit içine katılması aşağıdaki gibi çeşitli yöntemlerle gerçekleştirilmektedir [30, s 269].

- Daldırma ya da emprenye etme yöntemi. Burada pişmiş-seramik bağlı MgO ürünler, sıvı organik bileşikler içinde daldırma yoluyla emprenye edilmektedir.
- Organik bileşiklerin bağlayıcı olarak ve en sık uygulanan yöntemle göre katı taneli karbon içerikli maddelerin ilave edilmesiyle (doğal grafit v.b.) gerçekleştirilen üretim [30, s 269].

Refrakterlik ve cüruf dayanımının iyileştirilmesi, karbon katkılı magnezit tuğlanın üretiminde, yüksek saflıkta, yüksek yoğunlukta ve tercihen büyük periklas kristallerine sahip hammaddenin kullanılmasını gerektirmektedir (>%96 MgO-içeriği, >3.40 g/cm³ tane ham yoğunluğu).[30, s 269].

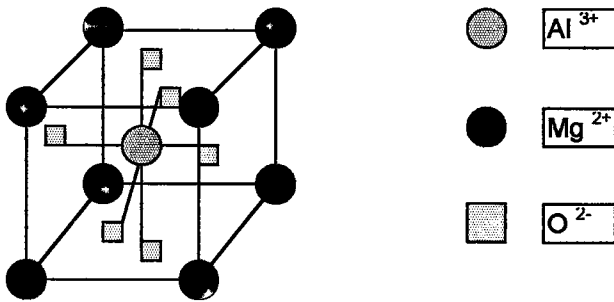
Bu tür refrakterler, son yıllarda bir takım gelişmelere sahne olmuştur. Bunlar;

- Karbonun oksitlenmeye (yanmaya) karşı korunması için antioksidan maddelerin kullanımı. Böylece yüksek sıcaklıklarda ortamdaki oksijenin refraktere olumsuz etkisi giderilmektedir.
- Mukavemetinin artırılmasına ilişkin çalışmalar, örneğin yapı içerisinde geçirgenliği azaltacak olan karbür ve nitrürlerin oluşturulması. Bunu sağlayacak maddeler ise; alüminyum, silisyum, magnezyum ve bunların alaşımları olarak sayılabilir [30, s 270].

Bu gelişmelerin katkısıyla; MgO-C refrakterler, özellikle potaların cüruf bölgelerinde gittikçe yaygınlaşan kullanım alanına sahip olmaktadır.

3.3.2 Spinel refrakterler

Spineller kristallografik açıdan özel bir yapıyı temsil etmektedirler. Katyon yerleri, 3 ve 2 değerli iyonlarla doludur. Buna uygun olarak ise $A^{2+}B^{3+}O_4$ genel formülü ile adlandırılmaktadır. Spinel, belirli bir atomal kafes yapısını ifade etmektedir. Şekil 3.8'de $MgAl_2O_4$ (MgO- Al_2O_3 -spinel)'e ait tipik spinel kristal kafes yapısı görülmektedir [31, s 22-23].



Şekil 3.8 MgO- Al_2O_3 -Spinel kafes yapısının şematik görünümü [31, s 23]

Refrakterlik amaçlı hammadde olarak sentetik spinellerin gelişimi, pikrokromit (MgCr_2O_4) ve magnezya-alümina-spinel (MgAl_2O_4) ile ifade edilebilir. MA-spinelin en önemli avantajları; atmosferik değişimler karşısındaki daha az hassasiyeti, alkalilere karşı dayanımı, hacimsel stabilite ve yüksek sıcaklıklarda daha az buharlaşma eğilimi olarak sıralanabilir. Bu spinel türü, çimento ve cam fırınlarında refrakter malzeme olarak bir süreden beri kullanılmaktadır. 1980'lerden itibaren spinel içeren magnezit tuğlalar, çelik endüstrisinde kullanılmakta olan magnezit-krom tuğlaların yerini almaya başlamıştır [30, 31].

$\text{MgO-Al}_2\text{O}_3$ -spinel (MgAl_2O_4)'in molar oranı 1:1, kütle oranı ise %28.2 MgO, %71.8 Al_2O_3 'dür. MA-spinelin kafes yapısında iki oksijen iyonu, (111) düzlemine paralel olarak sıkı paket kübik yapıyı oluşturmaktadır. Katyonlar ise oktahedral ve tetrahedral boşluklara gömülmüştür. Her oksijen iyonu aynı anda üç oktahedron ve bir tetrahedrona aittir [32].

Bazı spinel refrakter örneklerinin kimyasal ve fiziksel özellikleri, Tablo 3.1 ve 3.2'de verilmektedir. Buna göre; yığın yoğunlukları türüne bağlı olarak, 3.22-3.40 g/cm^3 arasında değişmektedir. Bu değerler teorik yoğunluğun %90'nına denk gelmektedir. Korozyon dayanımları, spinellerin açık poroziteleri ile orantılıdır. Bu da spinel üretim prosesinin önemli konularından birini oluşturmaktadır. Bahsi geçen spinel örneklerinin açık porozite değerleri incelendiğinde, oldukça düşük değerler olduğu görülmektedir [33].

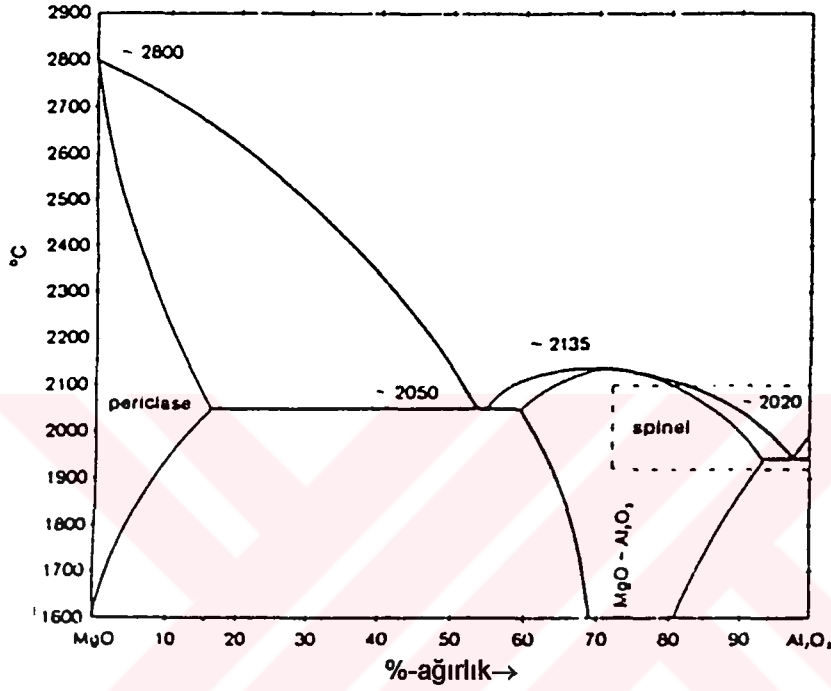
Tablo 3.1 Spinel örneklerinin kimyasal bileşimi [33]

(%)	A	B	C
Al_2O_3	66	76	90
MgO	33	23	9
CaO	<0.4	<0.3	<0.25
SiO_2	<0.09	<0.06	<0.05
Na_2O	<0.05	<0.15	<0.17
Fe_2O_3	<0.1	<0.1	<0.1

Tablo 3.2 Spinel örneklerinin fiziksel özellikleri [33]

Fiziksel Özellikler	A	B	C
Yığın yoğunluk (g/cm^3)	3.24-3.30	3.22-3.28	3.30-3.40
Açık porozite (%)	0.8-1.5	0.8-1.5	1.5
Su absorpsiyonu (%)	<0.8	<0.8	<1
Kristal boyutu (μm)		60-80	60-80

MgO-Al₂O₃-spinelin faz diyagramında (Şekil 3.9) bir adet normal ergiyen ara bileşik gözlenmektedir. Stokiometrik olarak %28.2 MgO ve %71.8 Al₂O₃ bileşime sahip MgAl₂O₄ spinelinin ergime sıcaklığı, 2135°C'dir. Alümina kenarındaki ikinci ötektik bileşim ise 1950°C'de ağırlıkça %97 alümina, %3 magnezit içermektedir. Alümina köşesindeki birinci ötektik (2050°C), ince taneli sinterlenmiş alümina üretimi için teknik öneme sahiptir [34-36].



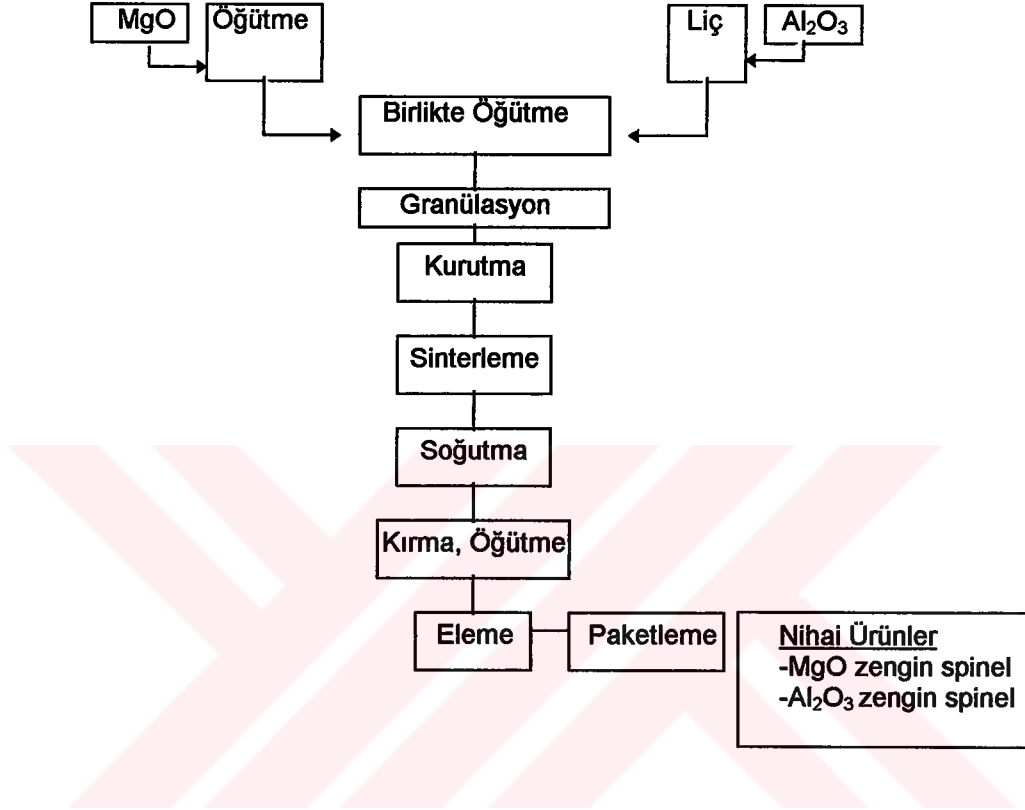
Şekil 3.9 MgO-Al₂O₃ faz diyagramı [33]

Günümüzde tabular alümina¹ [37, 38] üretiminden kazanılan deneyimden yararlanılarak, katı hal reaksiyon sinter prosesi ile bir kaç tip sinter spinel elde edilmektedir. Tablo 3.2'de bu tür spinellere ait kimyasal analizler verilmektedir. Şekil 3.10'da bu spinellerin üretimine ait akım şeması verilmektedir [33].

Ön öğütme işlemi ile Al₂O₃ ve MgO birarada belirli bir tane boyutuna düşürülür. Kurutma işlemini takiben prosesin en önemli aşamalarından birisi olan ve ürünün

¹ Tabular alümina, alüminanın ergime noktasının bir miktar altındaki sıcaklıklarda tutularak korunduma dönüştürülmüş halidir. ALCOA Firması, tabular alümina ifadesini, <2000°C'de pişirilmiş alümina ürünlerini tanımlamak için de kullanmaktadır [37]. Alüminanın yüksek sıcaklıklardaki bu işlemi sonucu büyük kristalli taneler elde edilmektedir. Bunlar, 50-400µm ince düz korundum kristalleridir [38].

gözenekliliği ile yoğunluğunu etkileyen sinterleme işlemi gelmektedir. Sinterleme koşulları olarak adlandırabilecek, maksimum sinter sıcaklığı, ısıtma/soğutma hız ve süreleri, nihai ürünün temel kalitesini belirlemektedir. Yapılan araştırmalar, tabular Al_2O_3 sinter prosesinin, döner ve tünel fırın sinter proseslerine göre daha avantajlı olduğunu göstermektedir [33].



Tablo 3.2'deki A örneğinin MgO oranı yüksek olduğundan, magnezyaca zengin spinel olarak tanımlanmaktadır. Bu spinel malzeme, döner çimento fırınlarındaki MgO-spinel refrakter tuğlalar için ve diğer bazik uygulamalardaki Al_2O_3 esaslı refrakterlerin yerini alması için geliştirilmiştir. Diğerleri ise %76 ve 90 Al_2O_3 içerdiklerinden alüminaca zengin spineller olarak adlandırılmaktadır [33].

Çelik potalarında kullanılmak üzere üretilen MA-spinel refrakterde gerekli olan özellikler şunlardır:

- Spinel bileşiminde serbest MgO bulunmaması,
- Yeterli kalıntı poroziteyle beraber, minimum açık porozite,
- Yüksek sıcaklıkta hacimsel kararlılık,

- Yeterli kristal tane boyutu,
- Kristalin kararlılığı

Açık porozite miktarı azaltılırken, mümkün olan en büyük kristal tane boyutu muhafaza edilerek, cüruf-refrakter etkileşiminin minimuma indirilmesi amaçlanmaktadır. Bu maksimum yığın yoğunluğunun sağlanmasıyla eş anlam taşımaktadır. Kapalı porlar ise optimum termal şok sağlaması açısından önemlidir [33].

Spinel malzemeler, 10 μm .’a kadar ve yüksek oranlarda daha önce de bahsedildiği gibi taneler arası (intergranüler) porlar içermektedir. Magnezya zengin spinelin kristal boyutu 30 μm . olurken, alümina zengin spinellerde büyüyerek 60-70 μm .’a ulaşmaktadır. %90 Al_2O_3 içeren spinel örnek malzemesi, oldukça homojen bir spinel dağılımı gösterirken, %76 Al_2O_3 içeren diğer örnekte homojen spinel dağılımı yanısıra kalsiyumca zengin bölgelere de rastlanmaktadır [33].

Çelik üretim sektöründe dökülebilir refrakterlerin dayanım karakteristiklerini geliştirmek amacıyla, yüksek alümina içerikli yeni spinel malzemeler geliştirilmiştir. Bu malzemelerin kullanımı ile cürufa karşı dayanımda, magnezya zengin spinellere oranla kayda değer miktarda artma gözlenmiştir. Malzeme karakteristikleri açısından ilerleme sağlamak için alümina zengin spinel ile reaktif alüminanın karıştırılması önemli bir aşama olmuştur [33].

Sıvı çelik döküm potalarının monolitik olarak kaplanması, MA-spinelin maliyet faktörünün olumlu etkisiyle etkin olarak kullanılmaya başlandığı bir alan olarak görülmektedir. Japonya, bu gelişmelerin öncülüğünü yapmaktadır. Zirkonyum silikat, dolomit ve boksit refrakterlerden dökülebilir spinelli refrakterlere doğru bir kayma göze çarpmaktadır. Japonya’da dolomit refrakter kullanımından spinel esaslı monolitik kaplamaya olan geçiş sonucu toplam maliyette %20-30 oranında düşüş sağlanmıştır. Zirkonyum silikattan, alümina spinel dökülebilirler yapılına geçiş sonucu toplam refrakter sarfiyatında ise %10’a kadar düşmeler gözlenmiştir [33].

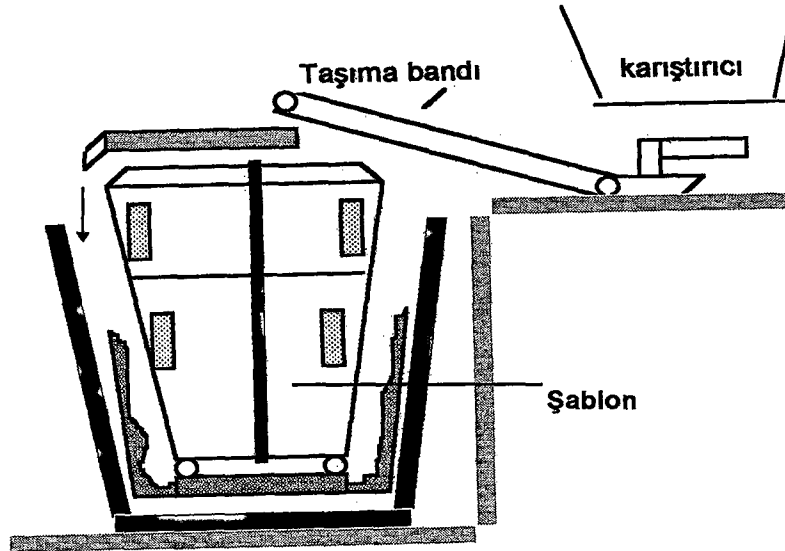
Bu geçişin önemli nedenlerinden biri de spinellerin dökülebilir uygulama teknikleriyle ekonomiklik ve zaman olarak avantajlar sağlamasıdır. Dökülebilir uygulamalar arasında, titreşim teknikleri (vibrasyon) [15] ve daha sonraları geliştirilen titreşim prosesini ortadan kaldıran kendi kendine akmalı dökme spinel

(self-flowing-castable) uygulamaları [34] sayılabilir. Bu sistemlerle, mekanik hale getirilen refrakter astar örüm tekniği ile yüksek işletme güvenliği sağlanırken, atık (kullanılmış) refrakter ürünün yeniden değerlendirilmesi ile de maliyetler önemli ölçüde azaltılmaktadır. Bu sayede çevre kirliliği, atık depolama sorunları da en aza indirilmektedir. Şekil 3.11’de bir çelik pota aşınma astarı bölgesinde dökülebilir refrakter malzemenin vibrasyonla uygulanması görülmektedir. Bu sistemle 100 t.’dan büyük kapasiteli potalar da rahatlıkla örülebilmektedir [15].

Çelik endüstrisinde alüminaca zengin spinel malzeme yönündeki tercihin en önemli nedenleri:

- Daha temiz çelik eldesi,
- Dökülebilir astar uygulaması ile tuğla üretimine kıyasla zaman ve para tasarrufu sağlanması,
- Krom-magnezit refrakterlerin bilinen çevre zararlarına karşın, alümina zengin spinelin sağladığı aynı ya da daha üstünlük gösterdiği performansıyla, krom-magnezit refrakterlerin yerini alması.

şeklinde sıralanabilir. Ayrıca geliştirme olanaklarının yüksek olması, gelecekte kalitesinin giderek artacağı inancını kuvvetlendirmektedir. Reaktif alümina ilavesiyle cürufa karşı direnci artırılabilir [33].



Şekil 3.11 Vibrasyonla pota astarının dökülebilir refrakterle örümünün şematik gösterimi [15]

4 Refrakterlerin Termal, Mekanik ve Kimyasal Özellikleri

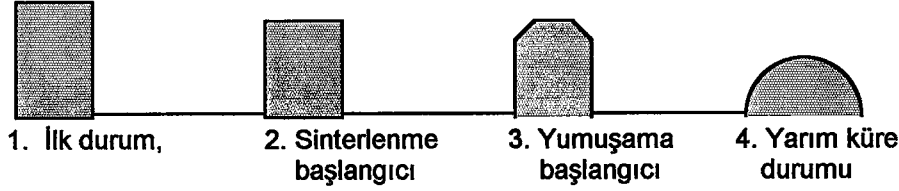
Refrakterler genel olarak, yüksek sıcaklıklarda yumuşamaya karşı dirençli malzemeler olarak tanımlanmaktadır. 1800°C'nin üzerinde yumuşama davranışı gösteren malzemeler, yüksek refrakterlik özelliği gösteren malzemeler olarak sınıflandırılmaktadırlar. Refrakter malzemeler, yüksek sıcaklıklara karşı dayanımlarının yanı sıra, proses şartlarının gerektirdiği termal, mekanik ve kimyasal özelliklere sahip olmalıdırlar. Bu özellikler; refrakterlik, sabit basınç altında refrakterlik, termal genleşme, termal şok dayanımı, ısı iletkenlik, spesifik ısı, yığın yoğunluk, porozite miktarı ve dağılımı, soğukta basma mukavemeti ve refrakterin cürufa karşı dayanımı şeklinde sıralanabilir [39, s 118-130].

4.1 Termo-Mekanik Özellikler

4.1.1 Refrakterlik

Refrakterin ve refrakteri oluşturan hammaddelerin yumuşama/ergime sıcaklığının ve davranışının bilinmesi büyük önem taşımaktadır. Bu amaca yönelik olarak kullanılan test metodlarından birisi, Seger Konileri Metodu'dur. DIN 51063 Standardı Bölüm 1'de esasları belirtilen yöntemle göre; alümina tabla üzerine dizilen standart seger konileri yanı sıra test edilecek refraktere ait koni şeklindeki numunenin sıcaklık karşısındaki davranışı incelenmektedir. Burada refrakterin yumuşayıp boyun verdiği sıcaklık, standart konilerle karşılaştırılması sonucu belirlenmektedir [39-40].

Diğer bir yöntem, yüksek sıcaklık mikroskobu ile yapılan deneylerle tesbitlendirilen yöntemdir. Şekil 4.1'de bu deney yöntemi, şematize olarak gösterilmektedir. Burada artan sıcaklık karşısında refrakterde meydana gelen değişimler, sürekli izlenmekte olup, refrakter numunesinin yumuşama davranışı takip edilmektedir. 4 numaralı yarım küre, kritik sınır durumuna gelindiğini göstermektedir ve bu noktadaki sıcaklık, sınır sıcaklığı olarak tespit edilmektedir [30, s 67].



Şekil 4.1 Yüksek sıcaklık mikroskobu ile yapılan refrakterlik ölçümünde oluşumların şematik gösterimi [30, s 67]

4.1.2 Sabit basınç altında refrakterlik

Refrakterlik deneyleri, refrakter malzemelerin yumuşama davranışının belirlenmesinde tek başına yeterli olmamaktadır. Zira pratikte refrakter malzemeler, yüksek sıcaklığın yanı sıra ayrıca mekanik etkilere de uğramaktadırlar. Bu nedenle, kullanım esnasında gerçekte şekil değiştirici yumuşama eğilimi daha düşük sıcaklıklarda başlamaktadır [39, s 118].

Kristal yapılı fazın, plastik akma davranışı göstermesi, ancak yüksek sıcaklıkta ve basınç gerilmesi altında meydana gelmektedir. Artan sıcaklık karşısında özellikle bağlayıcı fazların eriyik faz oluşturduğu gözlenmektedir. Refrakterlerdeki yumuşama davranışının başlangıcı, bu tür eriyik fazların oluşmasından sonra belirlenmektedir. Zira yumuşama, eriyik fazın oranının yapı içinde artışı ile birlikte viskozitesinin giderek azalması sonucu kendisini göstermektedir. Kristal fazın yapısının, yumuşama davranışı üzerine önemli etkisi bulunmaktadır. İğne şeklindeki kristallerden oluşmuş refrakterin yumuşamaya karşı direnci yüksek, buna karşılık yuvarlak yapılı kristallerden oluşmuş refrakterlerin, yumuşamaya karşı direnci ise daha az olmaktadır. Refrakterin yumuşama eğilimini arttıran fiziksel bir özellik olarak yüksek porozite görülmektedir. Yüksek poroziteli refrakterler, yumuşamaya daha düşük sıcaklıklarda başlamaktadır [39, s 118-119].

Refrakterin yumuşama davranışının belirlenmesi kadar önemli bir başka konu, refrakterin artan sıcaklık karşısındaki deformasyon eğiliminin gözlenmesidir. Özellikle termal genişlemelere bağlı meydana gelen maksimum deformasyonların belirlenmesi, refrakter astar örümü sırasında malzeme seçimi gibi konulara ışık tutması açısından önem taşımaktadır [39, s 119].

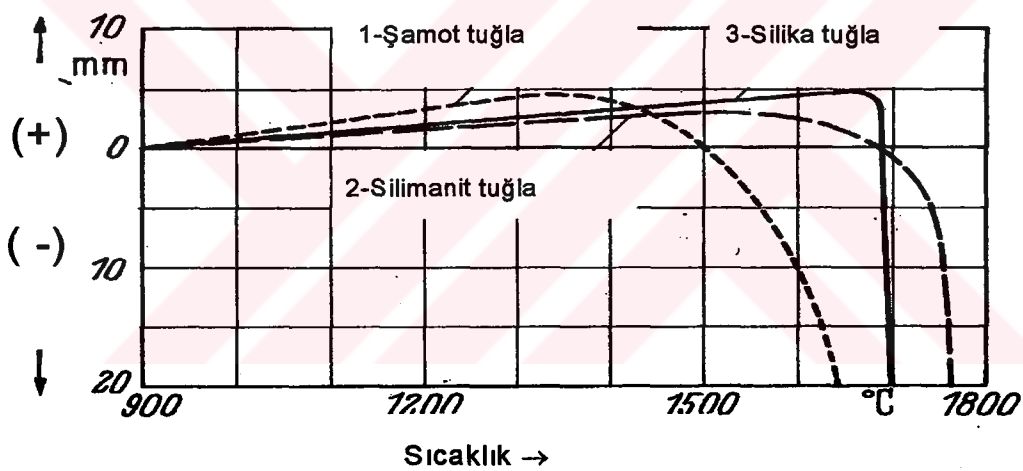
Şekil 4.2'de çeşitli refrakterlerin sabit basınç altında artan sıcaklık ile genleşme/çökme davranışları sergilenmektedir. y-ekseninde (+) kısım, genleşme miktarını, (-) kısım ise, çökme miktarını mm. cinsinden ifade etmektedir. DIN 51064'e göre yapılan bu ölçümlerde, başlangıçta sıcaklık artışıyla görülen genleşmeler, termal genleşmeler sonucu meydana gelen deformasyonları ifade etmektedir. Bu eğrilerin artan sıcaklık karşısındaki davranışları, 't' harfi ile karakterize edilmektedir. Buna göre t;

t_0 : maksimum termal genleşmelerin görüldüğü sıcaklık,

t_a : ~0.3 mm. çökme sonucu deformasyonun görüldüğü sıcaklık,

t_c : ~10 mm. çökme sonucu deformasyonun görüldüğü sıcaklık

gibi değişik durumlar için değişik tanımlara sahip olmaktadır [39, s 119].



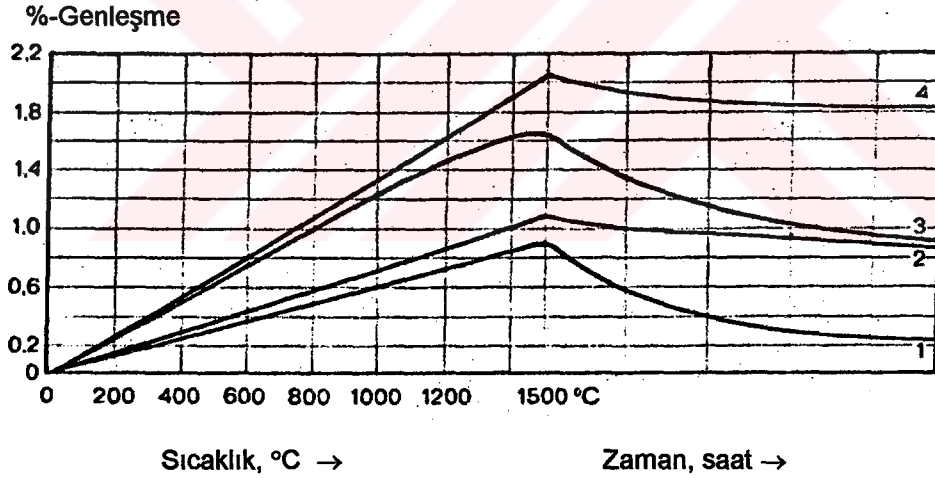
Şekil 4.2 Çeşitli refrakterlerin yüksek sıcaklıklarda ve 2 kp/cm² sabit yük altında refrakterlik davranışları [39, s 119].

t_c - t_a arasındaki farkın daha büyük olması, refrakterin viskozitesinin yüksek olmasının ve eriyik faz oranının daha yavaş artmasının bir sonucu olarak görülmektedir. Bu durumda yumuşamanın artması, sıcaklığın daha çok yükselmesine bağlı olmaktadır [39, s 119].

Ancak bu yöntemle yapılan ölçümlerin küçük bir eksikliği bulunmaktadır. Bu da numunenin yerleştirildiği cihazın kendisinin de artan sıcaklık karşısında gösterdiği deformasyon eğiliminin hesaba katılmamasıdır. Ayrıca ölçümler oksitleyici ortamda gerçekleştirilebilmektedir. Bu nedenlerle benzer başka ölçüm yöntemleri

geliştirilmiştir. Bu yeni yöntemle yapılan ölçümlere göre, numunenin uğradığı maksimum genleşme noktasından yapının %0.5, %1, %2 ve %5 deformasyona uğradığı sıcaklıklar $T_{0.5}$, T_1 , T_2 ve T_5 şeklinde belirlenmektedir. Numune boyutları, bir önceki yöntemde kullanılanlarla aynı, fakat ayrıca silindirik numunelerin her iki yüzeyinde ortalarından birer delik açılmaktadır. Böylece silindirik numune, alt ve üstten sıkı bir şekilde sabitlenmekte ve numunede meydana gelen deformasyonlar, daha kesin olarak ölçülmektedir. Bu yöntemle elde edilen sonuçlara göre; t_a değerleri, bir önceki yöntemle göre elde edilenden daha gerçekçi olarak, 70-100°C'ye kadar daha düşük sıcaklıkları gösterdiği belirlenmiştir [39-40].

Yük altında refrakterlik özelliğinin uzun süreli (zamana bağlı deformasyon) uygulaması, refrakterin sürünme direncini belirlemektedir. Buna ait esaslar DIN 51053 Bölüm 2'de verilmekte olup, deney metoduna ilişkin sonuçların sergilendiği Şekil 4.3'te çeşitli refrakterlerin zamana ve sıcaklığa bağlı yumuşama-akma davranışları gösterilmektedir [40, s 78].



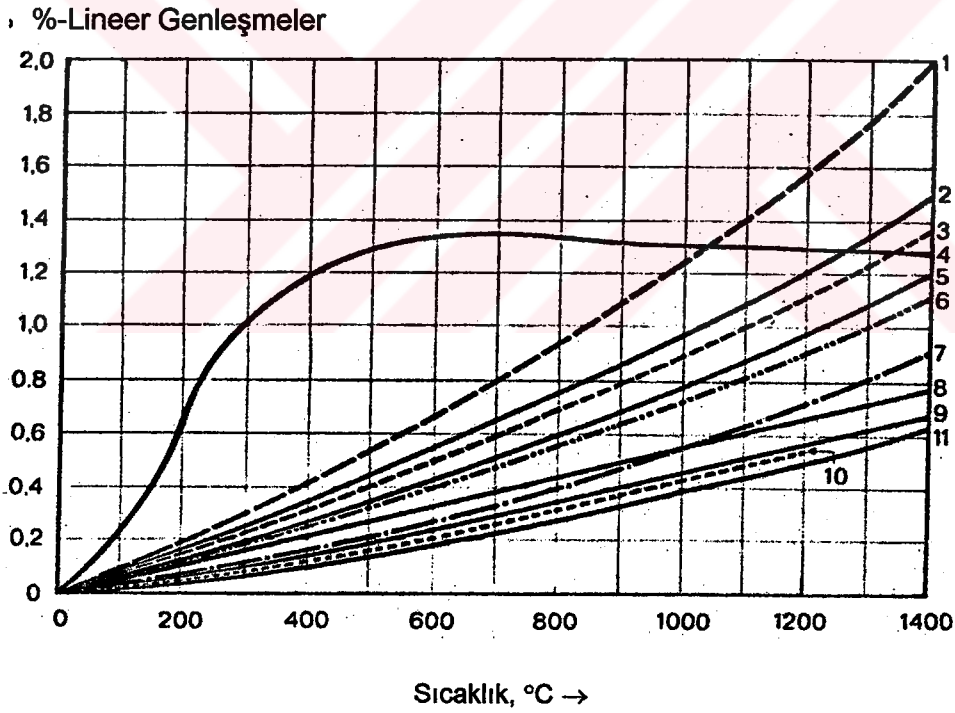
Şekil 4.3 Refrakterlerin yüksek sıcaklıkta (1500°C) basınç altında uzun süreli akma davranışları (1-yüksek alüminalı, 2-alümina, 3-magnezit-krom tuğla, 4-magnezit tuğla) [40, s 78]

4.1.3 Termal genleşme

Termal genleşme davranışı, özellikle refrakter astar örümü sırasında oldukça önemlidir. Gerekli genleşme payı dikkate alınmadan örülen refrakter astar sistemi, çalışma koşullarında çatlamalara ve parçalanmalara neden olmaktadır [39, s 121].

Termal genleşme; $\alpha=1/l_0.(dl/dT)$ şeklinde tanımlanmaktadır. l_0 , refrakterin ilk boyutunu, l , genleşme sonucu meydana gelen boyutu, T , sıcaklığı ifade etmektedir. Bu tanımlamaya göre; termal genleşmeler $1/^\circ\text{C}$ ve ya $1/\text{K}$ şeklinde belirtilebildiği gibi anlaşılma kolaylığı bakımından % olarak da ifade edilebilmektedir [39, s 121-122].

Şekil 4.4'te bazı refrakterlere ait lineer termal genleşme-sıcaklık davranışları sergilenmektedir. Bu davranışlar, malzemenin türüne göre oldukça farklılıklar gösterebilmektedir. Örneğin; Şekil 4.4'te de görüldüğü gibi, silika refrakter, 700°C 'ye kadar yüksek hızla genleşmektedir. Bu durum, silika refrakterin polimorfik faz dönüşümü sırasında meydana gelen genleşmelerin bir sonucudur. Diğer refrakter türleri, 1400°C 'ye kadar %0.5-2 arasında termal genleşmelere uğramaktadır [39-40].



Şekil 4.4 Bazı refrakter tuğlaların termal genleşmeleri (1-magnezit, 2-krom-magnezit, 3-kromit, 4-silika, 5-zirkonyumoksit, 6 ve 7-Korund, 8-şamot, 9-silimanit, 10-zirkon, 11-silisyum karbür) [39, s 122]

4.1.5 Termal şok direnci

Refrakterlerin, ani sıcaklık değişimlerine karşı mekanik direncini belirlediğinden, termal şok direnci, önemli bir özelliği karakterize etmektedir. Periyodik olarak tekrarlanan çevrimlerle termal şok altında refrakter tuğlanın kafes yapısı zedelenmekte, daha sonraki çevrimlerde yapıda çatlak oluşmakta ve ya parçalanmalar meydana gelmektedir. Termal şok direnci, refrakter malzemenin kimyasal bileşiminden, içerdği poroziteye, hammadde tane boyutundan, kristal yapısına kadar bir çok özelliğe bağlıdır [39-40].

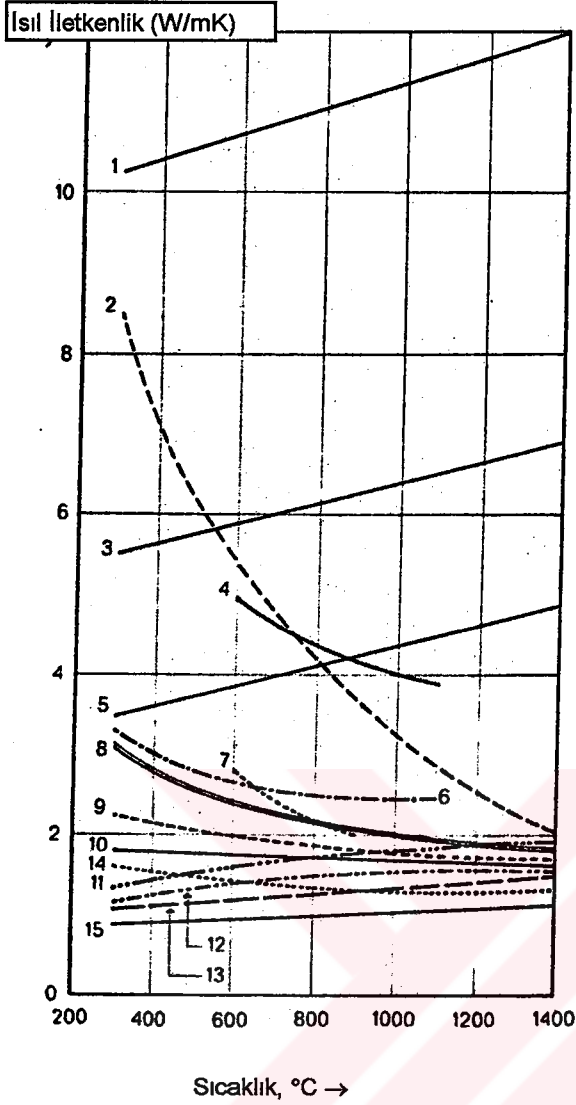
Termal şok direncinin ölçülmesi için iki farklı standart mevcut olup, bunlar DIN 51068 Bölüm 1'e göre, suda çevrim yöntemi ve Bölüm 2'ye göre havada çevrim yöntemidir. İlkinde; 950°C'deki test numunesi, oda sıcaklığındaki suya daldırılıp tekrar fırına döndürülmektedir. Bu çevrim, numunede çatlama görülünceye kadar sürdürülmektedir [40].

4.2 Termal Özellikler

4.2.1 Isı iletkenliği

Yüksek sıcaklıkların, özellikle refrakter malzemeler açısından bir başka önemi, ısı iletimi ile ilgili konulardır. Yüksek sıcaklıklarda özellikle ısı radyasyonunun yarattığı akımlar önem taşımaktadır. Refrakterlerin ısı iletim özelliği; kullanılan hammadde-lerin kimyasal bileşimi, massenin mineralojik yapısı, toplam porozite, por büyüklüğü, pişme sıcaklığı ve tane yapısına bağlıdır [39, s 123].

Isı iletkenliği fiziksel bir büyüklük olarak, 1 m. kalınlığındaki bir malzemenin 1 m²'lik yüzeyine etkiyen 1K'lık sıcaklığın ΔT kadar iletilmesi için gerekli enerji olarak tanımlanmaktadır (W/mK). Bölüm 2.3'te ısı iletkenliğinin teorik ve matematiksel temelleri geniş olarak açıklanmıştır. Şekil 4.5'te çeşitli refrakter malzemelerin ısı iletkenliklerinin sıcaklıkla değişimi görülmektedir [40].



- 1-Silisyumkarbit %90
- 2-Magnezya
- 3-Silisyumkarbit %70
- 4-Korund 99
- 5-Silisyumkarbit %50
- 6-Sinterdolomit
- 7-Zirkon
- 8-Krom-magnezya
- 9-Korund 90
- 10-Silimanit
- 11-Forsterit
- 12-Kromit
- 13-Silika
- 14-Sert şamot
- 15-Şamot

Şekil 4.5 Çeşitli refrakterlerin ısı iletkenlikleri [39-40]

4.2.2 Spesifik ısı kapasitesi

Spesifik ısı (c), sıcaklığa bağımlı bir başka malzeme özelliğidir. Sıcaklık arttıkça c , artmaktadır. Kalorimetrelerle ölçülen bu büyüklük, herhangi bir maddenin 1 g.'nın sıcaklığını 1°C arttırmak için gerekli enerji miktarı olarak tanımlanmaktadır [40].

4.2 Fiziksel Özellikler

Refrakter malzemeler, oda sıcaklığında elastik davranış göstermektedirler. Elastisite sınırına ulaştıklarında maksimum temel çekme gerilmelerin doğrultusunda çatlaklar oluşmakta ve daha sonra kopma meydana gelmektedir. Aşağıda refrakter malzemelerin önemli fiziksel özellikleri ve bunlara uygulanan deney yöntemleri açıklanmaktadır [30, 39].

4.2.1 Porozite ve yığın yoğunluk

Porozite, kimyasal dayanım, mukavemet, ısı iletimi ve termal şok gibi özelliklere etkileri bakımından refrakter malzemelerin belirlenmesi ve -izolasyon amaçlı refrakterler hariç- düşük tutulması istenen önemli bir parametresidir [39, s 127].

Refrakter tuğlalardaki toplam porozite (açık ve kapalı porlar dahil) teorik yoğunluk (d) ve ham yoğunluğuna (d_h)bağlı olarak hesaplanmaktadır :

$$\% \text{ Toplam Porozite} = (d - d_h)/d \times 100$$

Çoğu durumda refrakterin yalnızca açık porlarının oranının belirlenmesi önemli olmaktadır. DIN 51056'da esasları belirtildiği şekilde gerçekleştirilen yöntemde; su ve refrakter birlikte kaynatılmaktadır. Böylece suyun refrakterin açık porlarından içeriye sızması sağlanmaktadır. Daha sonra suya doymuş refrakter ile kuru refrakter tuğlanın ağırlıkları farkı, aşağıda verilen eşitliğe göre, oranlanarak açık porların %'si tespit edilmektedir [39-40].

$$\% \text{-Görünür Porozite} = (M_D - M_K) / (M_D - M_A) \times 100$$

M_D : su ile doymuş ağırlık (g)

M_K : kuru ağırlık (g)

M_A : askı ağırlığı (g)

4.2.2 Soğukta basma mukavemeti

Soğukta basınç mukavemeti (SBM), refrakterin basınç gerilmesine karşı gösterdiği direncin bir ölçüsü olup, özellikle fırın tabanı ve tabana yakın bölgelerde kullanılan refrakter malzemelerde daha fazla önem kazanmaktadır. Refrakter malzemelerin üretimi sırasında, yüksek yoğunluk elde edilmesi ve daha yüksek presleme basınçlarıyla SBM'nin iyileştirilmesi sağlanabilmektedir [39-40].

Refrakterlerin SBM'i DIN 51067'ye uygun olarak oda sıcaklığında belirlenmektedir. Şekillendirilmiş refrakterin önceden kurutulması, temperlenmesi ya da sinterlenmesi, SBM'ini arttırmaktadır. Sinterleme sonucu yapı içinde tane büyümesi sağlanmakta ve porozite azaltılmaktadır. Böylece daha yoğun ve mukavemetli yapı elde

edilmektedir. SBM'ne etki eden bir başka özellik bağlayıcılarıdır. Zira bağlayıcı fazın sebep olduğu camlaşma sonucu SBM ve termal şok direnci olumsuz yönde etkilenmektedir [39-40].

4.3 Kimyasal Özellikler

Refrakter malzemelerin fırın ortamındayken gaz, cüruf ve sıvı metalle yaptıkları reaksiyonların iyi anlaşılması bunların etkisinin azaltılmasının ön koşuludur. Cüruf direnci, bir refrakter malzemenin, gaz ve buhar fazı da dahil olmak üzere, her türlü kimyasal etkileşime karşı mukavemetini belirlemektedir. Refrakter tuğla ile temas eden aşındırıcı bileşiklerin kimyasal bileşimleri çok farklı olup, buna bağlı olarak korozyon prosesleri de farklılık göstermektedir [41, s 29-33].

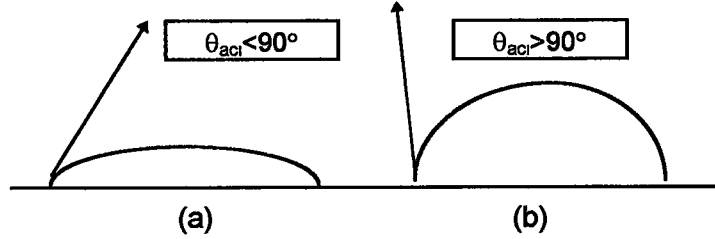
Kienow'a [42] göre üç çeşit cüruf-refrakter korozyonu gerçekleşmektedir. Bunlar;

- I. Sıvı cüruf ile refrakter arasında meydana gelen reaksiyonlar sonucu arayüzeyde ince bir tabaka oluşmaktadır. Oluşan bu tabaka, refrakter astar duvarındaki çözünmeyi daha da hızlandırmaktadır.
- II. Cüruf-refrakter reaksiyonu sonucu arayüzeyde oluşan yüksek viskoziteye sahip tabaka, cüruf yayınmasını yavaşlatıcı etkide bulunmaktadır.
- III. Sıvı cüruf-refrakter arasındaki reaksiyon son derece yavaş ilerleyebilmektedir. Sıvı cüruf ancak porlardaki basıncın etkisiyle, refrakter içinde yayınmaktadır. Ancak bu arada çözünen refrakterin, cüruf viskozitesini düşürmesi ve arayüzey gerilimini yükseltmesiyle yayınıma hızlanmaktadır.

Refrakterlerin cüruf ile etkileşimi genel olarak şu parametrelere bağlıdır: refrakter malzemenin bileşimi, cüruf bileşimi, sıvı cürufun viskozitesi ile ortam sıcaklığı. Ayrıca kimyasal karakter olarak ele alındığında, bazik karakterli refrakterlerin, bazik esaslı cüruflara ve asidik refrakterlerin de asidik esaslı cüruflara daha dirençli oldukları bilinmektedir [43].

Refrakter astarın temasta olduğu sıvı cüruf tarafından korozyona uğratılması, üç safhadan geçerek meydana gelmektedir [44]. Bunlar;

- 1) *Refrakter yüzeyinin cüruf tarafından ıslanması* : Refrakterlerin cüruf ile etkileşiminde ilk aşama, refrakterin cüruf tarafından ıslanabilme özelliğidir. Şekil 4.6'da görüldüğü üzere, yüzey geriliminin meydana getirdiği temas açısına (θ) bağlı olarak ıslanabilme olayında iki farklı durum söz konusudur.



Şekil 4.6 Sıvı cüruf ile refrakterin yüzey gerilimi arasındaki temas açısının şematik gösterimi; (a) ıslanma, (b) ıslanmazlık durumunu gösterir [45, s 57]

Temas açısının 90° 'den küçük olduğu durumda, cüruf refrakter üzerinde yayılma gösterir ve refrakteri ıslatır. Cüruf korozyonunun gerçekleşmesi için önce bu ıslanmanın meydana gelmesi gerekmektedir ki; genelde sıvı-katı sistemlerinde böyle bir durum gözlenmektedir. Eğer temas açısı 90° 'den büyükse; cüruf, refrakter yüzeyi üzerinde damlalar şeklinde kalacak ve ıslanma olayı meydana gelmeyecek yani refrakter korozyonu az oranda gerçekleşecektir.

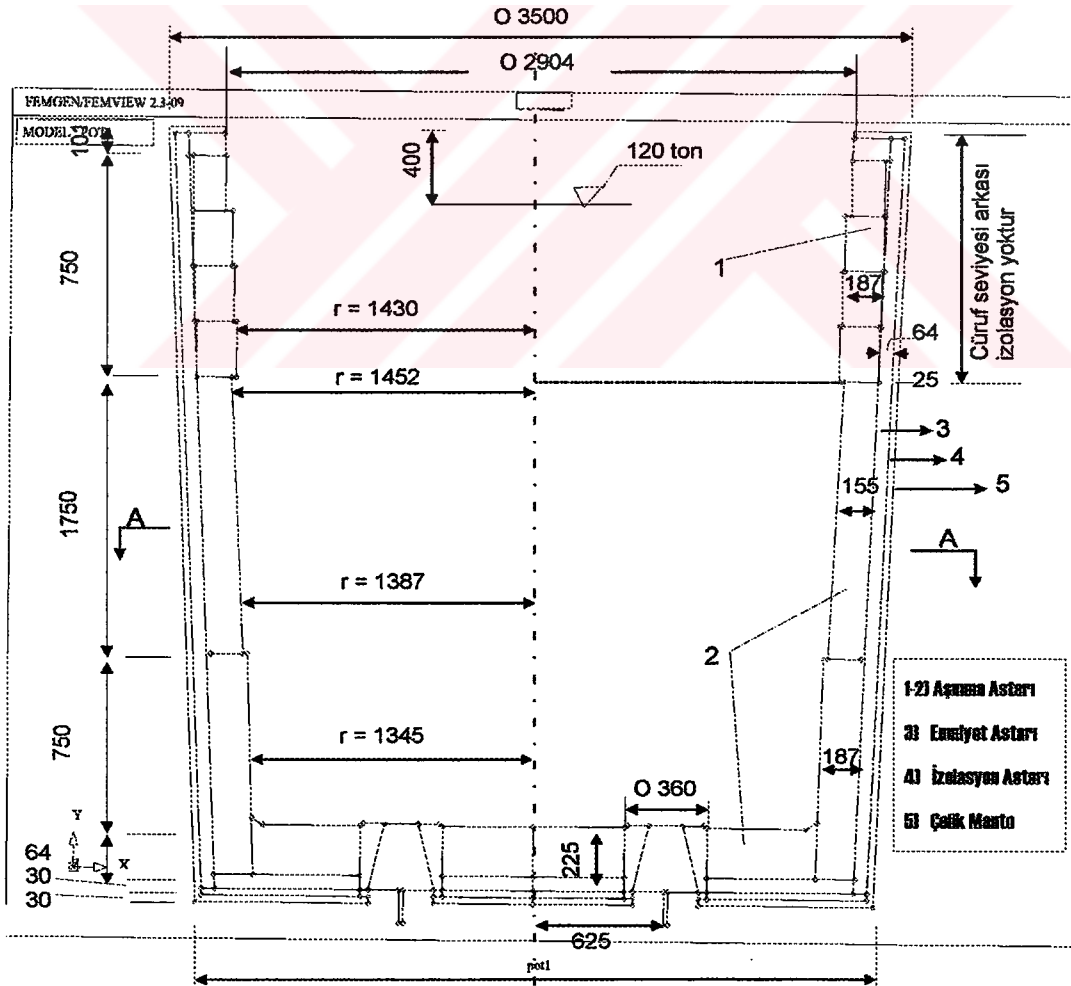
- 2) *Cürufun gözeneklere dolması* : Cüruf-refrakter arayüzeyinde ıslanma gerçekleştikten sonra, cüruf refrakterin yüzeyindeki açık gözeneklerden içeriye sızmaya başlar. Bu aşamada, refrakterin açık porozite yüzdesi önemli rol oynar ve porozite düştükçe cüruf etkileşimine direnç artar.

- 3) *Cürufun refrakter taneleri korozyonu* : Refrakterin gözeneklerinden içeri sızan cürufun etkisinde, birbirlerine komşu iki refrakter tanesinin, yüzey gerilimleri arasındaki açı belirleyici olmaktadır. Şekil 4.7'den de görüldüğü gibi, ara açısı (ϕ) küçüldükçe tanelerin cürufla teması artacaktır. Ara açısının 0° 'ye yaklaşması durumunda, cüruf iki tane arasına ince bir tabaka halinde girmiş olacak ve taneleri hızla birbirinden ayıracaktır. Ara açısının büyümesi, taneler arasındaki katı-katı bağ yapısını daha geliştireceği için cüruf direncinin yüksek olmasını sağlayacaktır.

5 AŞINMA ASTARI $MgO-C/MgO$ ve $MgO-Al_2O_3$ -SPİNEL REFRAKTERLERLE ÖRÜLÜ ÇELİK POTASI REFRAKTER ASTARININ SEY İLE MODELLENMESİ VE TERMAL, MEKANİK, TERMOMEKANİK DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ ve SONUÇLAR

5.1 Sonlu Elemanlar Analizlerine Giriş

SEY ile gerçekleştirilen çalışmanın konusu, çelik üreticisi ERDEMİR A.Ş.'de [47] kullanılmakta olan 120 t.'luk bir sıvı çelik döküm potasının refrakter astar dizaynından seçilmiştir. Şekil 5.1'de bu potanın kesit görüntüsü ve standart teknik detayları gösterilmiştir.



Şekil 5.1 Potanın eksenel simetrik kesit görünümü ve teknik ayrıntılar (boyutlar mm.'dir) [47]

Şekilden de görüldüğü gibi, pota iki bölgeden oluşmaktadır; üstteki cüruf bölgesi ve onun altındaki sıvı çelik çalışma bölgesi. Potanın refrakter astar katmanlarına bakılacak olursa içten dışa doğru; 1-2) aşınma astarı, 3) emniyet astarı, 4) izolasyon astarı (sadece sıvı çelik çalışma bölgesi çepeçevre) ve 5) çelik manto katmanlarından oluştuğu görülmektedir.

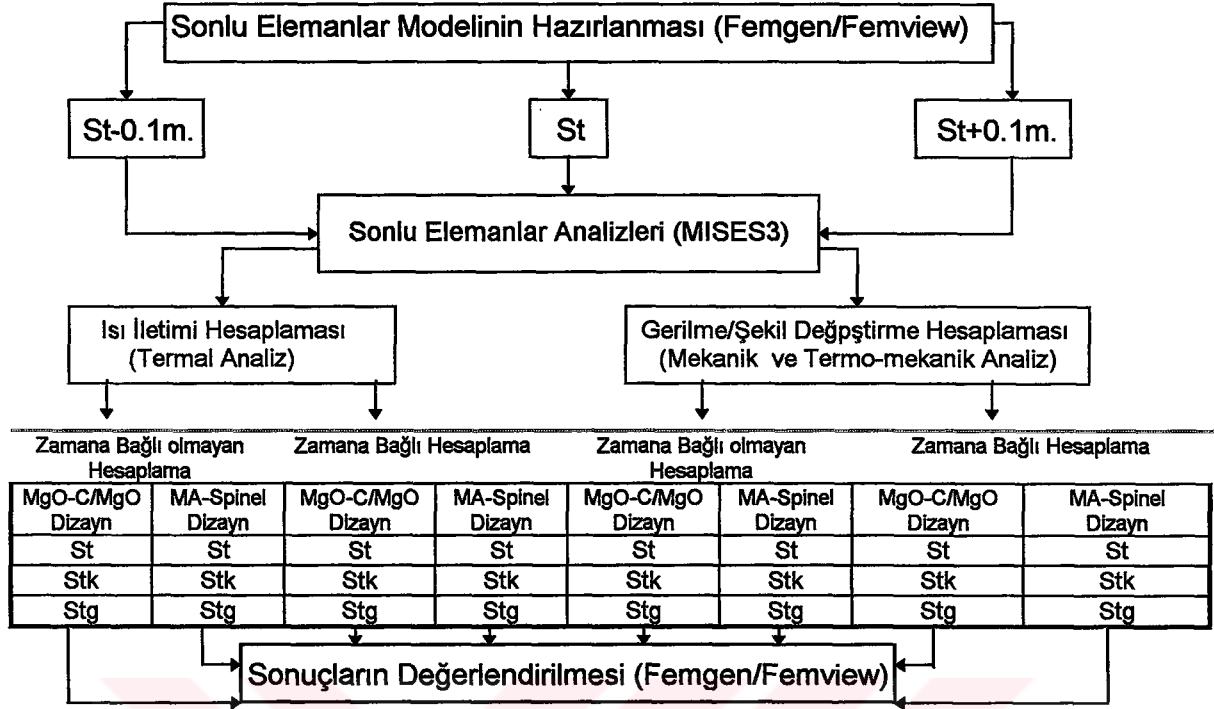
Yapılan çalışmada yukarıdaki şekilde belirtilen *standart (st)* boyutlu pota modelinin yanısıra *standart refrakter astar kalınlığındaki boyutlardan 0.1m. daha dar (stk)* ve *standart refrakter astar kalınlığındaki boyutlardan 0.1m. daha geniş (stg)* iki ayrı modelleme daha yapılmıştır. Böylece astar tabakası kalınlığının, termomekanik özellikler üzerine etkilerinin gözlenmesi amaçlanmıştır.

Farklı boyutlardaki bu pota modelleri üzerinde ise iki farklı refrakter malzeme ile örülü astar dizaynı dikkate alınmıştır. Bunlardan ilki; cüruf bölgesi aşınma astarı olarak *karbon katkılı magnezit (MgO-C)*, sıvı çelik çalışma bölgesi aşınma astarı olarak *katran bağlı magnezit (MgO)* refrakter malzemelerinin kullanıldığı dizayndır. Bu dizayn, günümüzde endüstride kullanılmakta olan bazik astar dizaynı olmaktadır. İkincisi ise; bazik astar dizaynı içindeki MgO ve MgO-C tuğla refrakterlere alternatif olarak kullanılması düşünülen ve Bölüm 3.3.2'de geniş olarak açıklandığı gibi; uygulama kolaylıkları, ekonomiklik gibi avantajlar getiren *magnezya-alumina-spinel (MgO-Al₂O₃-spinel) dökme* refrakter malzemesinin kullanıldığı dizayndır.

Böylece farklı refrakter malzeme türlerinin termo-mekanik özellikler üzerine etkilerinin gözlenmesi amaçlanmıştır. Çalışma konusunun temelini oluşturan bu değişkenler, Tablo 5.1'de toplu olarak özetlenmiştir. Bölüm 2.1'de anlatılan işlem yolu izlenerek, bu çalışmaya uyarlanmış olan işlem adımları ise Şekil 5.2'deki akım şemasında gösterilmiştir.

Tablo 5.1 Çalışmanın temel değişkenleri

Kalınlık→	Standart (st)		Standart -10cm. (stk)		Standart +10cm. (stg)	
	1. dizayn	2. dizayn	1. dizayn	2. dizayn	1. dizayn	2. dizayn
Cüruf Bölgesi Aşınma Astarı	MgO-C	MA-Spinel	MgO-C	MA-Spinel	MgO-C	MA-Spinel
Sıvı Çelik Böl. Aşınma Astarı	MgO	MA-Spinel	MgO	MA-Spinel	MgO	MA-Spinel



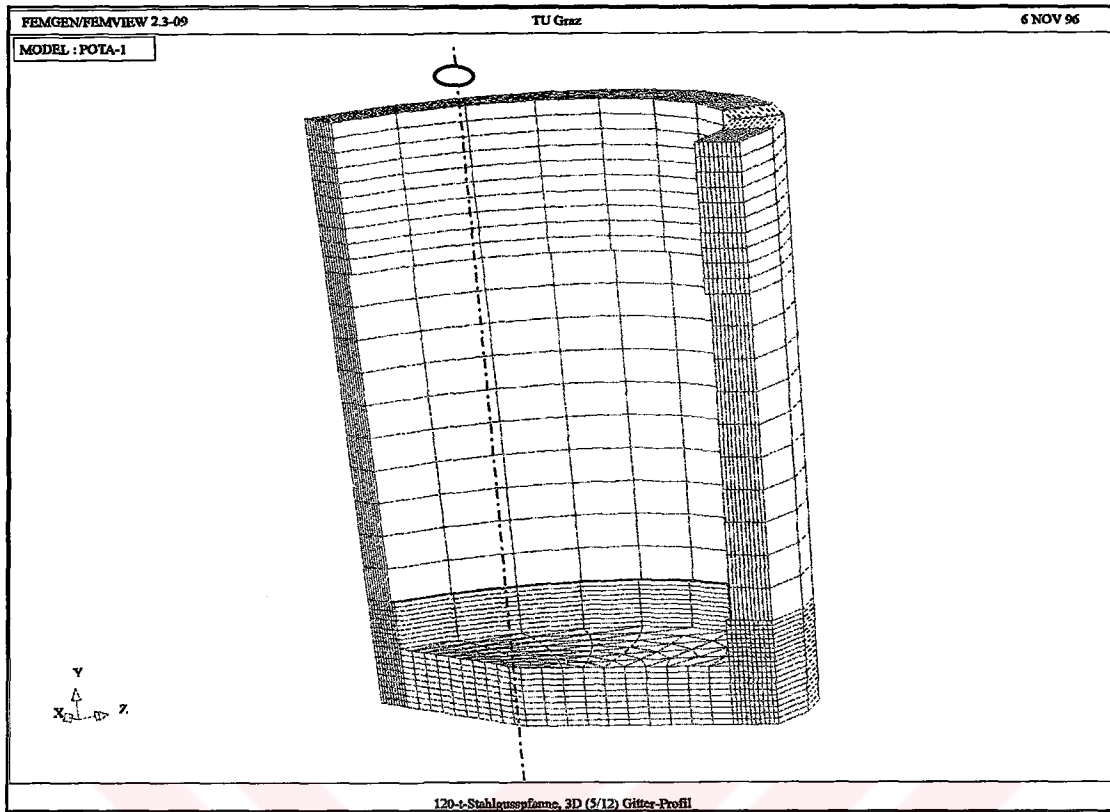
Şekil 5.2 Hesaplamalarda izlenen yol ve işlem adımları

Sonlu Elemanlar çalışması, UNIX tabanlı işletim sistemine sahip Digital DEC5000 marka iş istasyonunda gerçekleştirilmiştir. Sonlu elemanlar modelleri, Femgen/Femview [16] 'pre- and post-processing-software' ile sonlu elemanlar analizleri ise MISES3 [17] 'FEM-software' kullanımıyla gerçekleştirilmiştir.

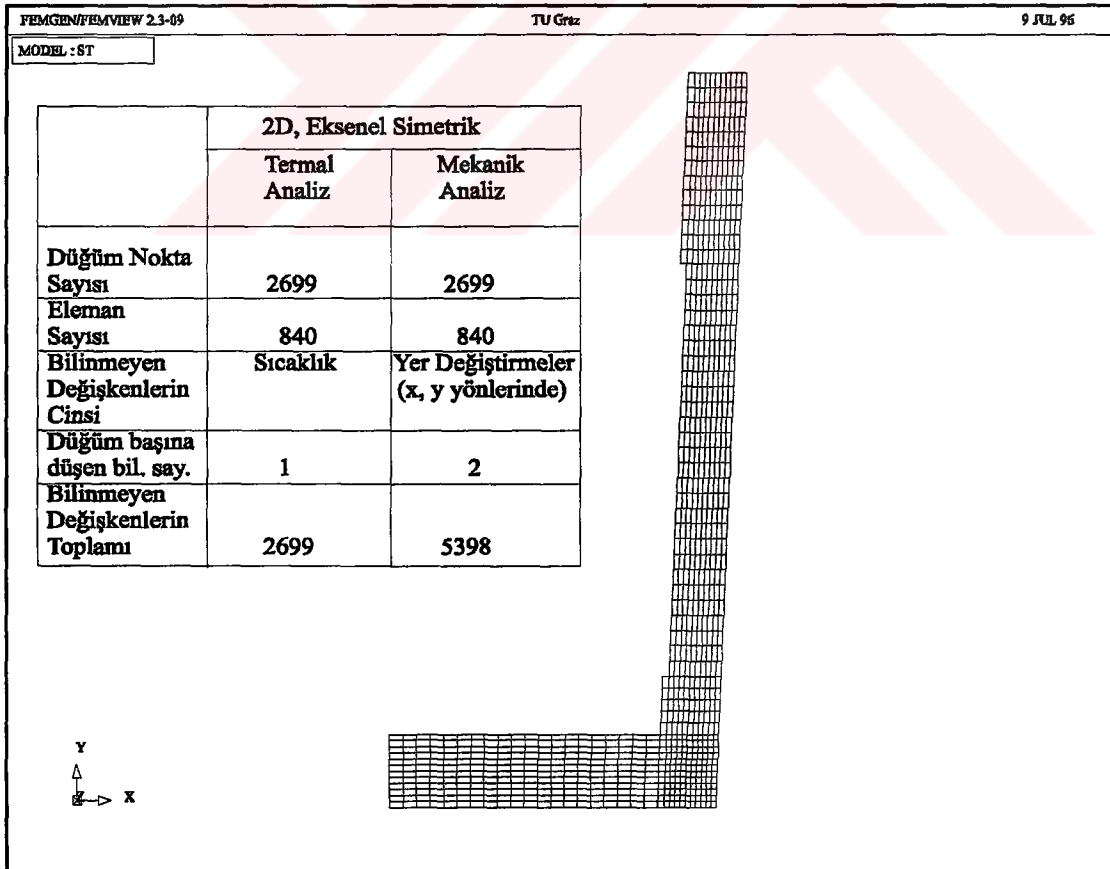
5.1.1 Sonlu elemanlar modelinin hazırlanması

Eksenel simetrik özelliğe sahip potanın geometrik modeli, Şekil 5.3'te görülmektedir. Simetri Kanunu uyarınca, eksenlerden sadece bir tarafın dikkate alınması ve 2-boyutlu eksenel simetrik olarak modelin hazırlanması mümkün olmaktadır [20-21, 48].

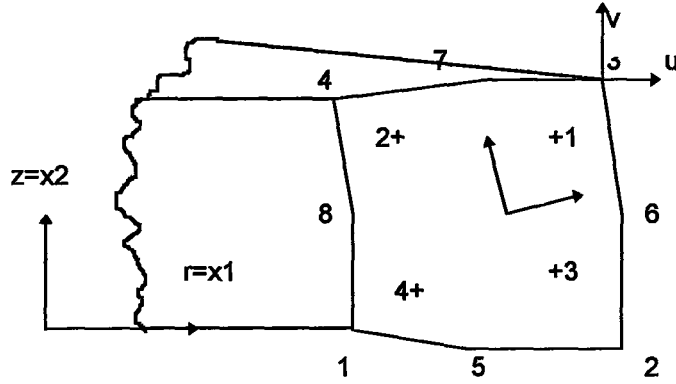
Femgen/Femview'de standart model (st) için yapılan programlama adımları ve açıklamalar, Ek C'de verilmektedir. Model, 2-boyutlu, eksenel simetrik, izoparametrik özelliklere sahiptir. Şekil 5.4'te model ve modele ilişkin istatistikler verilmektedir. Her biri 8-düğümlü 840 eksenel simetrik elemandan oluşan modelde 2699 düğüm bulunmaktadır. Şekil 5.5'te modelde kullanılan elemanlardan bir görülmektedir.



Şekil 5.3 Potanın üç boyutlu kesit görünümü

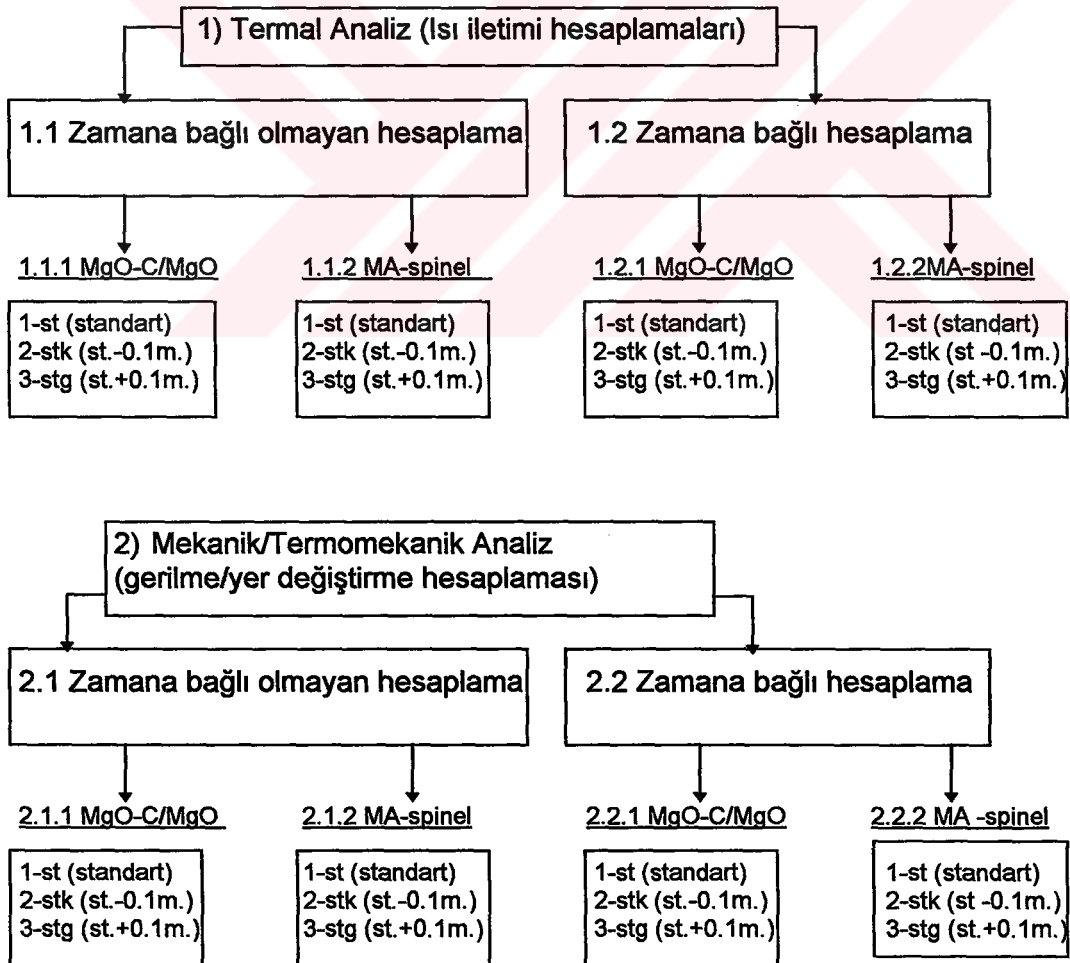


Şekil 5.4 Standart (st) sonlu elemanlar modeli ve modele ilişkin istatistikler



Şekil 5.5 8-düğümlü eksenel simetrik, izoparametrik dörtgen eleman [17]

SE-modelinin oluşturulmasından sonra, 'FEM-software MISES3' altında; 1) termal ve 2) mekanik ve termomekanik analizler gerçekleştirilmiştir. Bunun için izlenen yol şu şekilde özetlenebilir.



SE-hesaplamalarında model hazırlama işleminden sonra, bu modeli oluşturan malzeme ya da malzeme gruplarının seçimi, özelliklerinin programlama sırasında dikkate alınarak gerekli tanımlamaların yapılması gerekmektedir. Bu çalışmada iki farklı refrakter astar dizaynı kullanılmıştır. Bunlardan biri; MgO-C/MgO astarlı dizayn, diğeri MgO-Al₂O₃-spinel astarlı dizaynıdır. Pota astarı içinde geriye kalan emniyet, izolasyon astarları ile çelik manto her iki dizaynda da aynı özelliklere sahiptir. Tablo 5.2 ve 5.3'te her iki dizayn içinde kullanılan refrakter malzemelerin kimyasal özellikleri verilmiştir.

Tablo 5.2 MgO-C/MgO dizayna sahip pota astarı refrakter malzemelerinin kimyasal özellikleri [49, 50]

(%)→	MgO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	SiO ₂	Artık-C
1) Aşınma astarı (cüruf böl.)	99	0.2	0.1	0.7	0.1	5
2) Aşınma astarı (çalışma böl.)	97	0.2	0.1	1.9	0.8	—

(%)→	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	Na ₂ O+K ₂ O	CaO+MgO
3) Emniyet astarı	42-46	1.5-2.0	1.0	1.0	1.0
4) İzolasyon astarı*	30-40	2.5-3.0	—	1.5	1.5

* İzolasyon astarı, tüm dizaynlarda yalnız çalışma bölgesinde bulunmaktadır.

Tablo 5.3 MA-spinel dizayna sahip pota astarı refrakter malzemelerinin kimyasal özellikleri [33, 50]

(%)→	Al ₂ O ₃	MgO	CaO	SiO ₂	Na ₂ O	Fe ₂ O ₃
1-2) Aşınma astarı	76	23	<0.3	<0.06	<0.15	<0.1

(%)→	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	Na ₂ O+K ₂ O	CaO+MgO
3) Emniyet astarı	42-46	1.5-2.0	1.0	1.0	1.0
4) İzolasyon astarı*	30-40	2.5-3.0	—	1.5	1.5

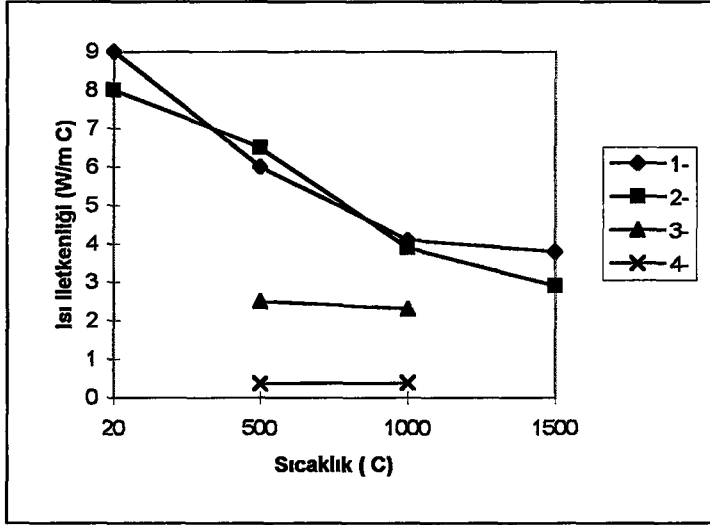
1* İzolasyon astarı, tüm dizaynlarda yalnız çalışma bölgesinde bulunmaktadır

5.1.2 Termal analiz

Pota refrakter astarındaki sıcaklık dağılımlarının ve sıcaklık gradyanlarının hesaplanması için gerçekleştirilen termal analizde kullanılmak üzere, refrakter malzemelerin sıcaklıkla ilgili fiziksel özelliklerinin tanımlanması gereklidir. Şekil 5.6 ve 5.7'de verilen grafiklerde, her iki dizaynda kullanılan malzemelerin ısı iletkenlik özelliklerinin artan sıcaklıkla değişimi görülmektedir.

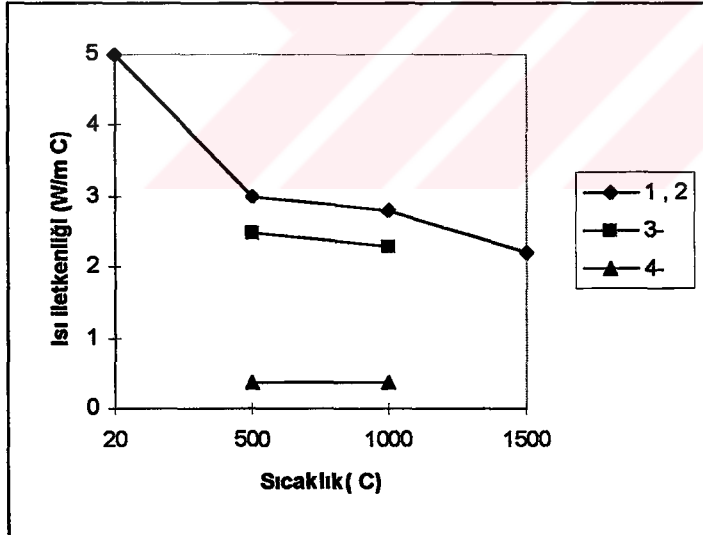
Teorik temelleri Bölüm 2.4 ve 2.4.1.1'de anlatıldığı gibi, bu aşamadan sonra sınır şartlarının belirlenmesi gerekmektedir. Çalışmanın konusunu, sıvı çeliğin konverterden potaya aktarılmasından sonraki durum teşkil etmektedir. Başka bir

ifadeyle, zamana bağılı olmayan hesaplamalar için pota iç ortam sıcaklığı 1500°C, dış ortam sıcaklığı ise 30°C olarak alınmıştır.



- 1) MgO-C (cüruf bölgesi aşınma astarı)
- 2) MgO (sıvı çelik bölgesi aşınma astarı)
- 3) Emniyet astarı
- 4) İzolasyon astarı

Şekil 5.6 MgO-C/MgO dizaynı içinde kullanılan refrakterlerin ısı iletkenliklerinin sıcaklıkla değişimi [27, 49-54]



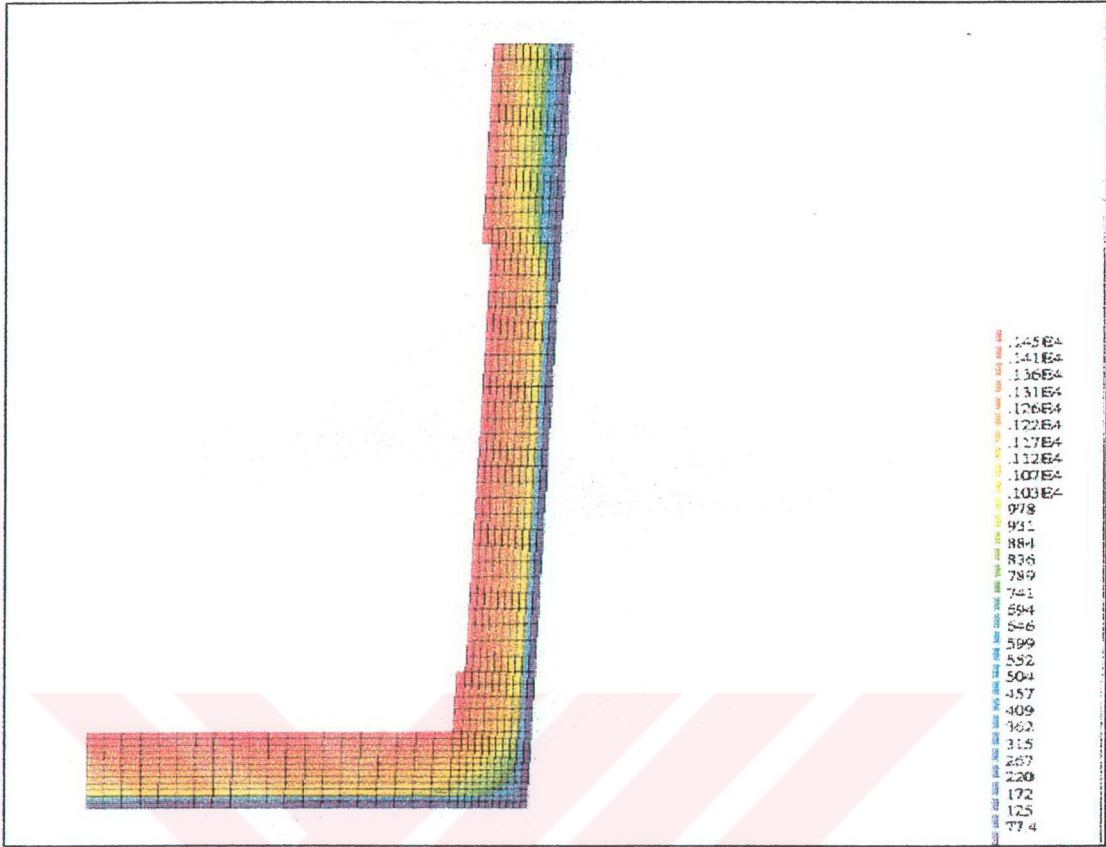
- 1-2) MgO-Al₂O₃-spinel (cüruf bölgesi ve sıvı çelik bölgesi aşınma astarı)
- 3) Emniyet astarı
- 4) İzolasyon astarı

Şekil 5.7 MgO-Al₂O₃-spinel dizaynı içinde kullanılan refrakterlerin ısı iletkenliklerinin sıcaklıkla değişimi [33, 39, 50, 55]

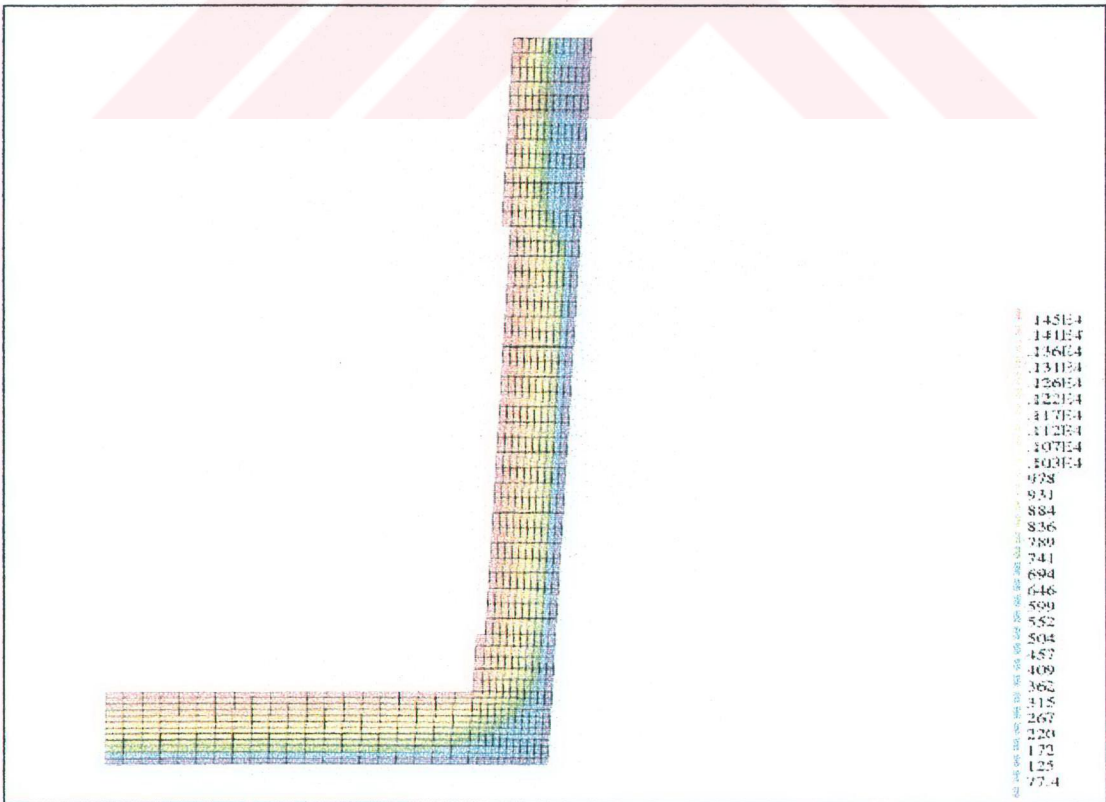
Tüm bu bilgilerin elde edilmesinden sonra, 'FEM Software' MISES3 altında, SE-analizi için programlama yapılmıştır. Örnek olarak, standart kalınlıktaki (st) ve MgO-C/MgO dizaynı için yazılmış program metni, Ek D'de verilmektedir. Benzer yolla devamında standart kalınlıktaki (st) MgO-C/MgO dizayna ait pota refrakter astarının *zamana bağlı olmayan* durumdaki sıcaklık analizi gerçekleştirilmiştir. Aynı programlama tekniği ve uygulanması, sırasıyla *stk* ile *stg* ve bunların *MgO-Al₂O₃-spinel* dizaynına sahip tüm modellere uygulanmıştır.

Elde edilen sonuçlar, yine Femgen/Femview altında, fakat bu defa 'post processing' amaçlı olarak değerlendirilmiştir (Şekil 5.8-5.13). Cüruf bölgesi ve sıvı çelik çalışma bölgeleri astarları içindeki sıcaklık dağılımları grafik olarak şekil 5.14-5.19'da verilmiştir.

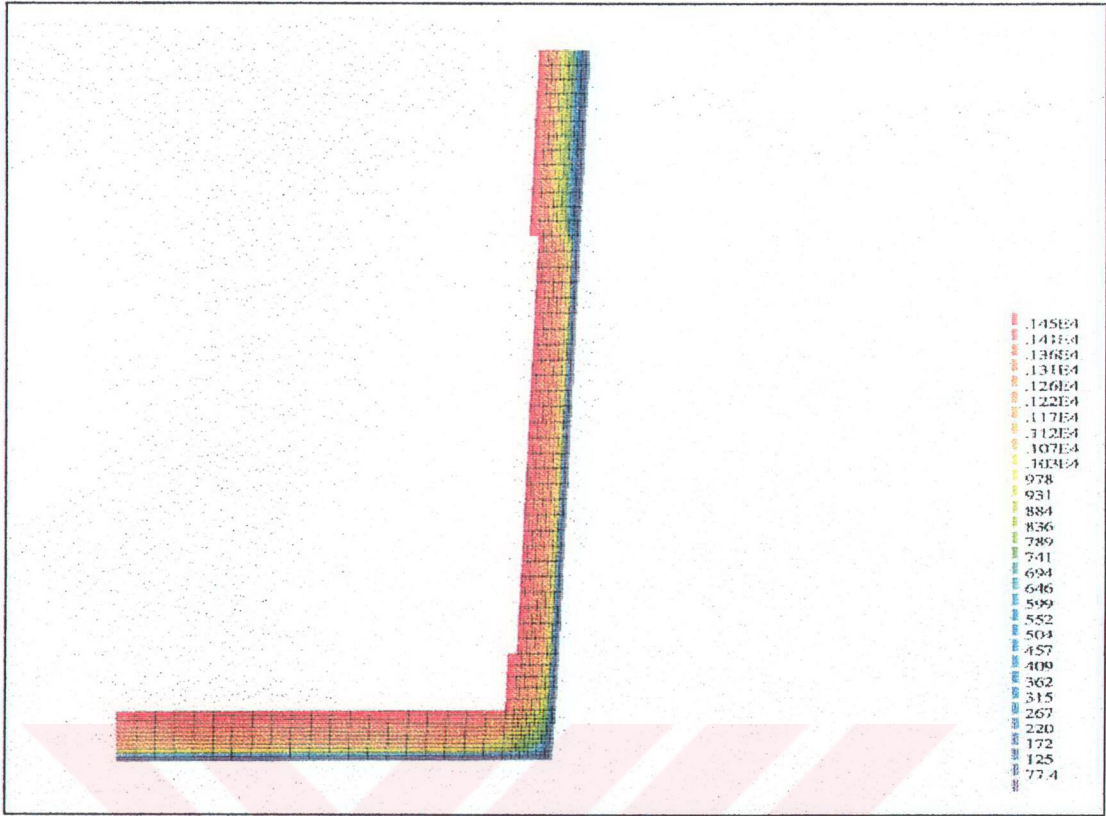




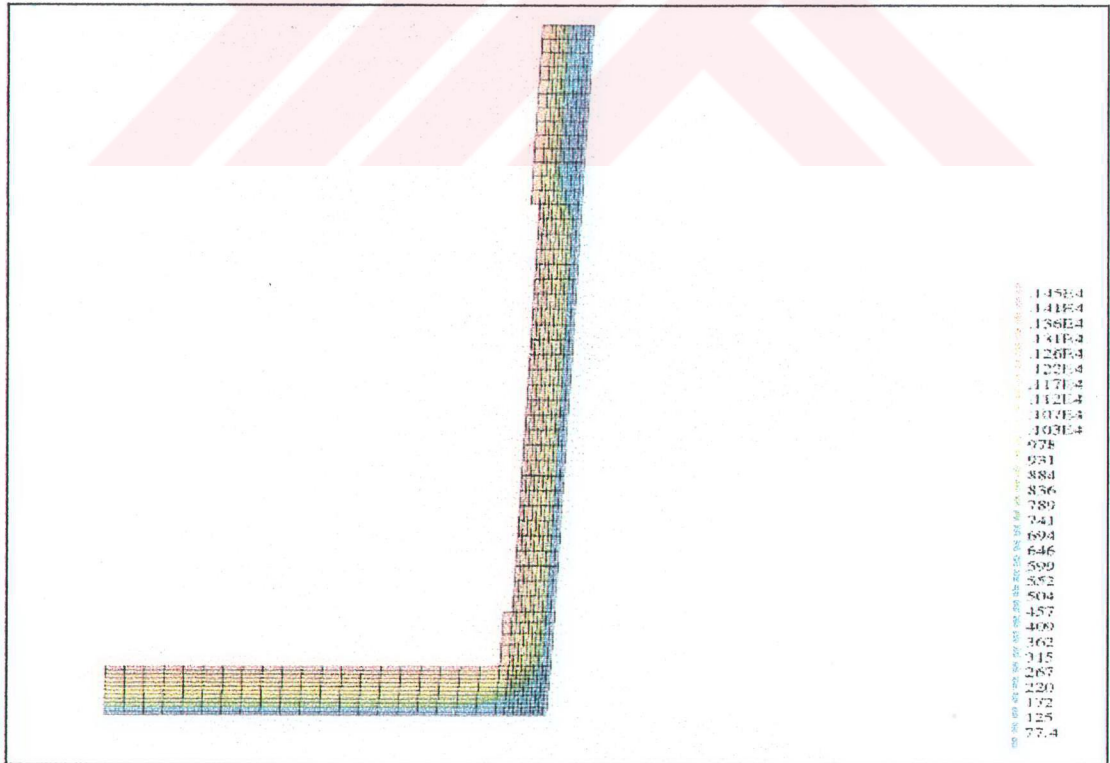
Şekil 5.8 St ve MgO-C/MgO dizaynına ait pota refrakter astarı içindeki sıcaklık dağılımı



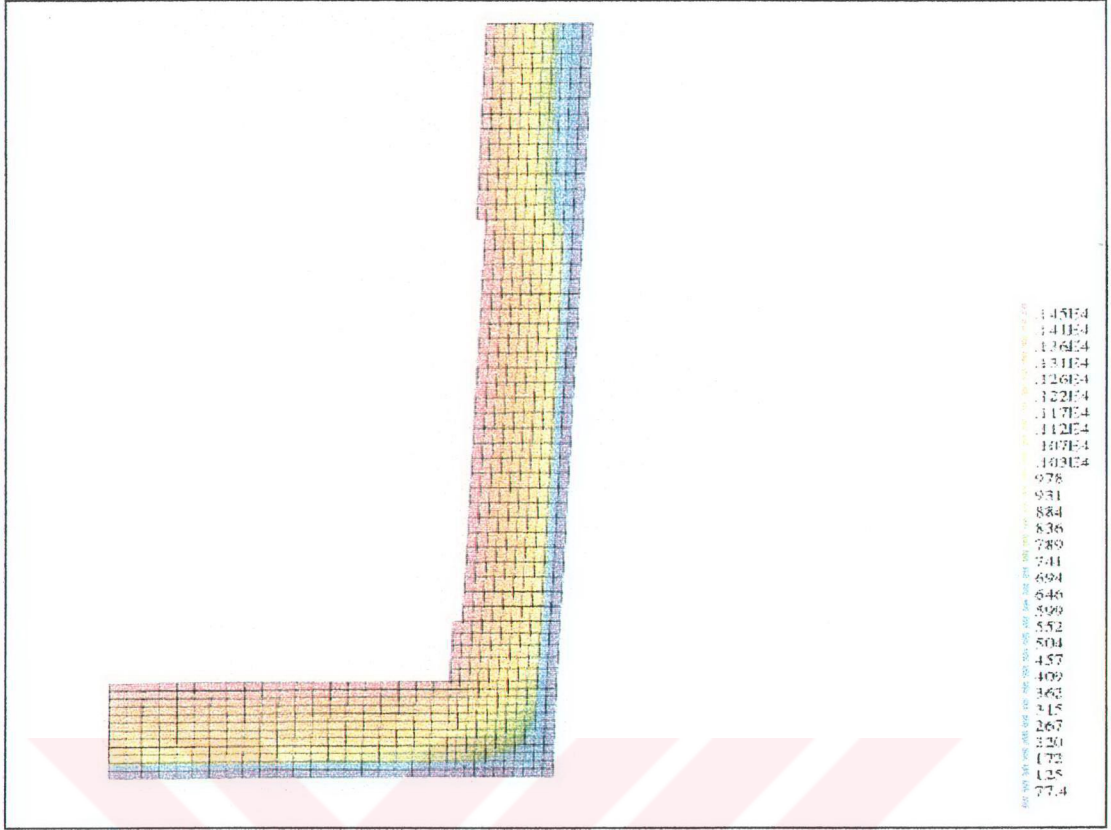
Şekil 5.9 St ve MA-spinel dizaynına ait pota refrakter astarı içindeki sıcaklık dağılımı



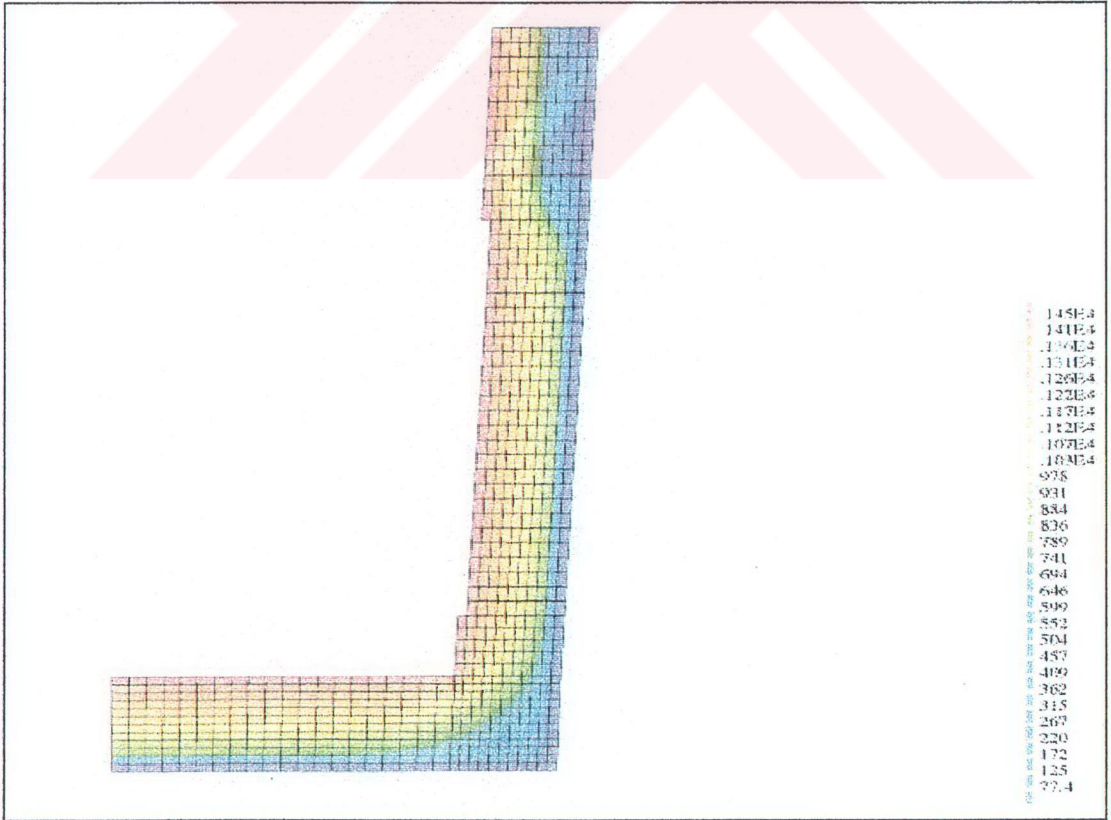
Şekil 5.10 Stk ve MgO-C/MgO dizaynına ait pota refrakter astarı içindeki sıcaklık dağılımı



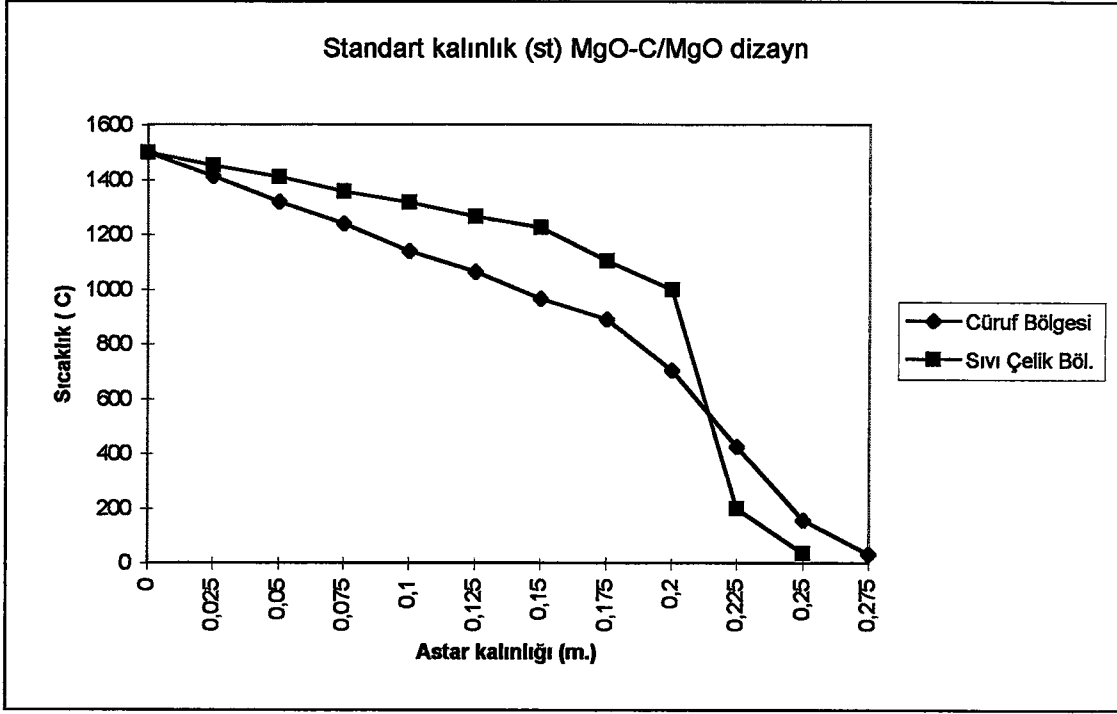
Şekil 5.11 Stk ve MA-spinel dizaynına ait pota refrakter astarı içindeki sıcaklık dağılımı



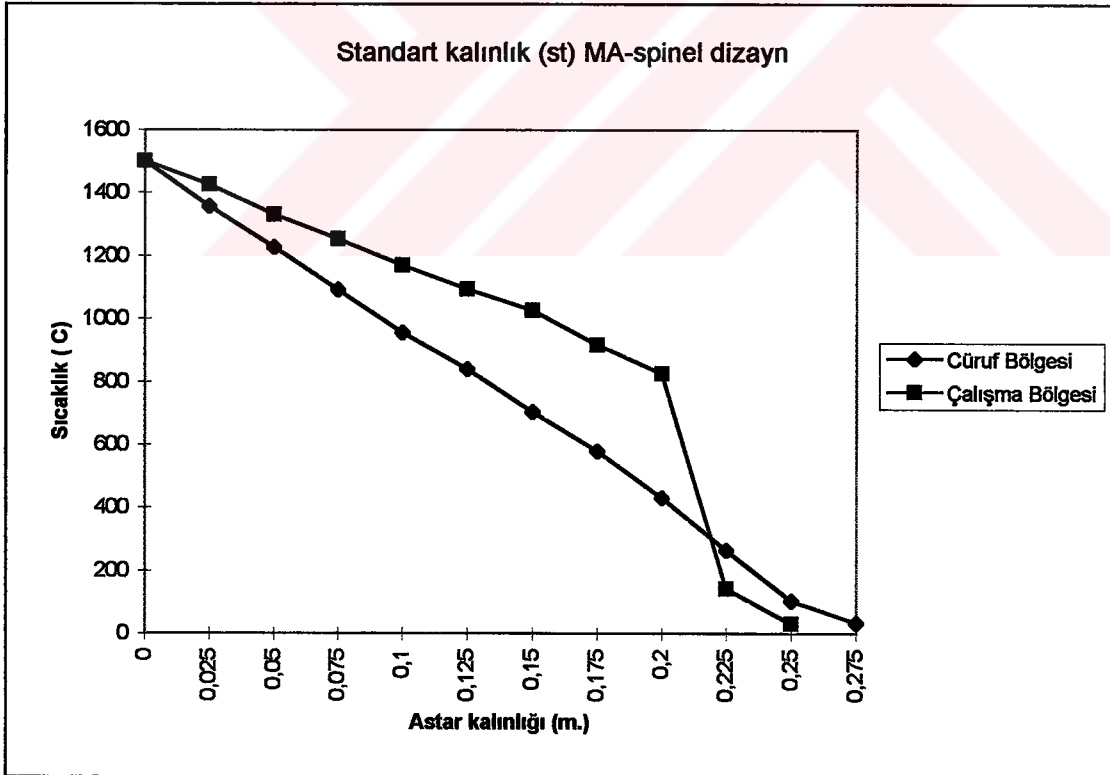
Şekil 5.12 Stg ve MgO-C/MgO dizaynına ait pota refrakter astarı içindeki sıcaklık dağılımı



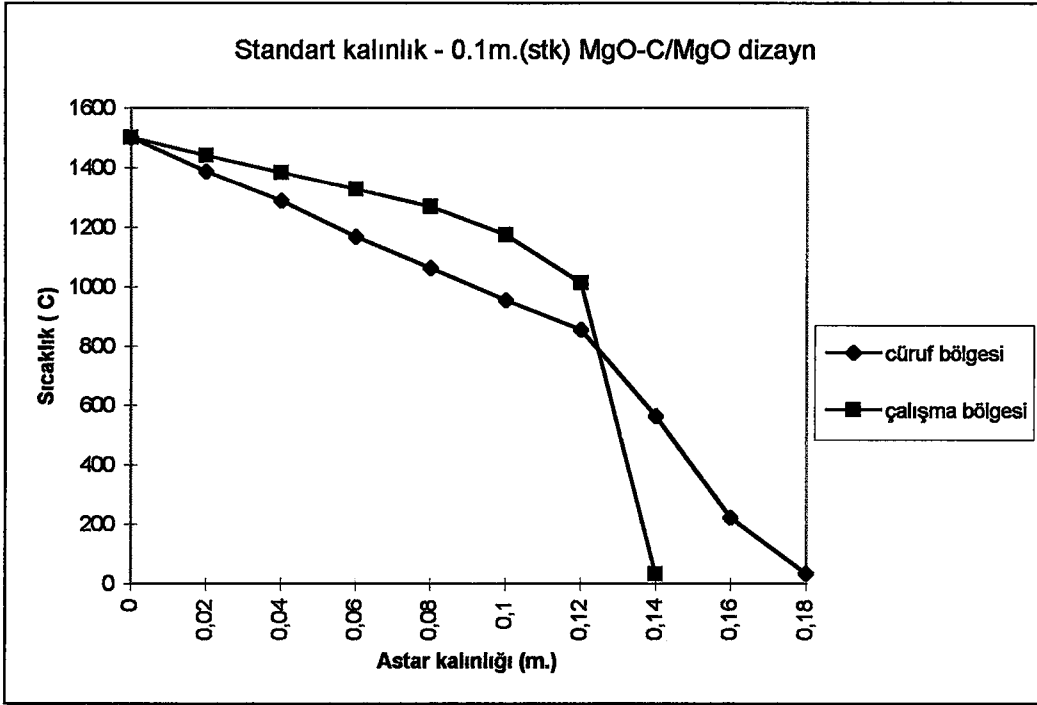
Şekil 5.13 Stg ve MgO-Al₂O₃ dizaynına ait pota refrakter astarı içindeki sıcaklık dağılımı



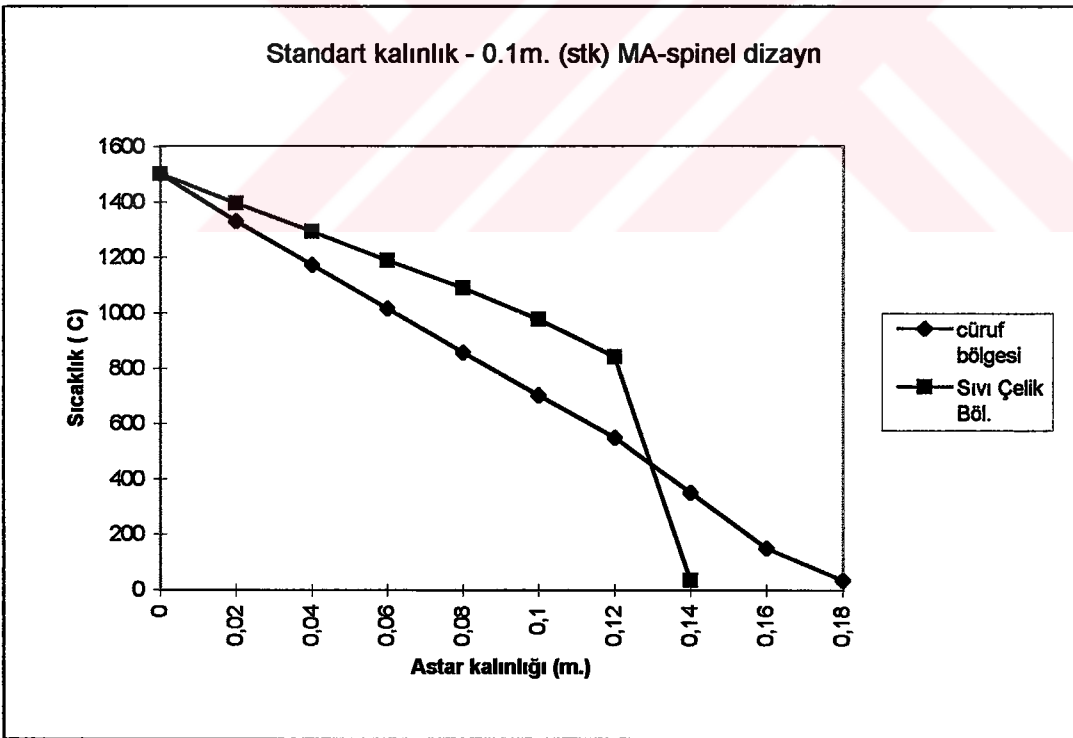
Şekil 5.14 St MgO-C/MgO dizaynı refrakter astar duvarındaki sıcaklık dağılımı



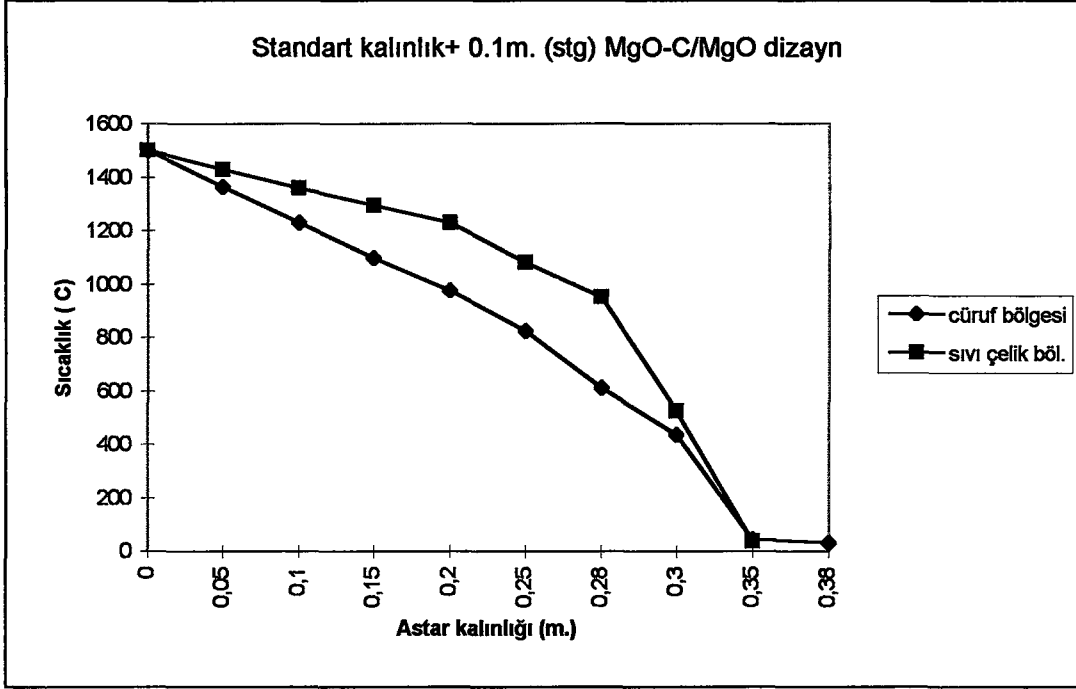
Şekil 5.15 St MA-spinel dizaynı refrakter astar duvarındaki sıcaklık dağılımı



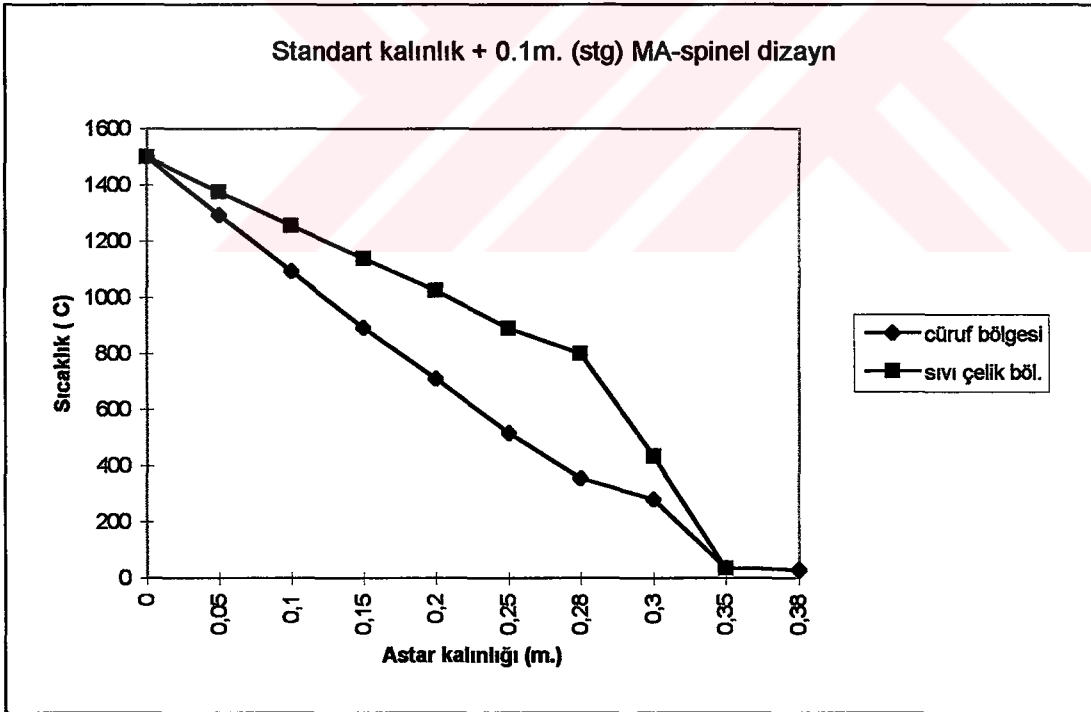
Şekil 5.16 Stk MgO-C/MgO dizaynı refrakter astar duvarındaki sıcaklık dağılımı



Şekil 5.17 Stk MA-spinel dizaynı refrakter astar duvarındaki sıcaklık dağılımı



Şekil 5.18 Stg MgO-C/MgO dizaynı refrakter astar duvarındaki sıcaklık dağılımı

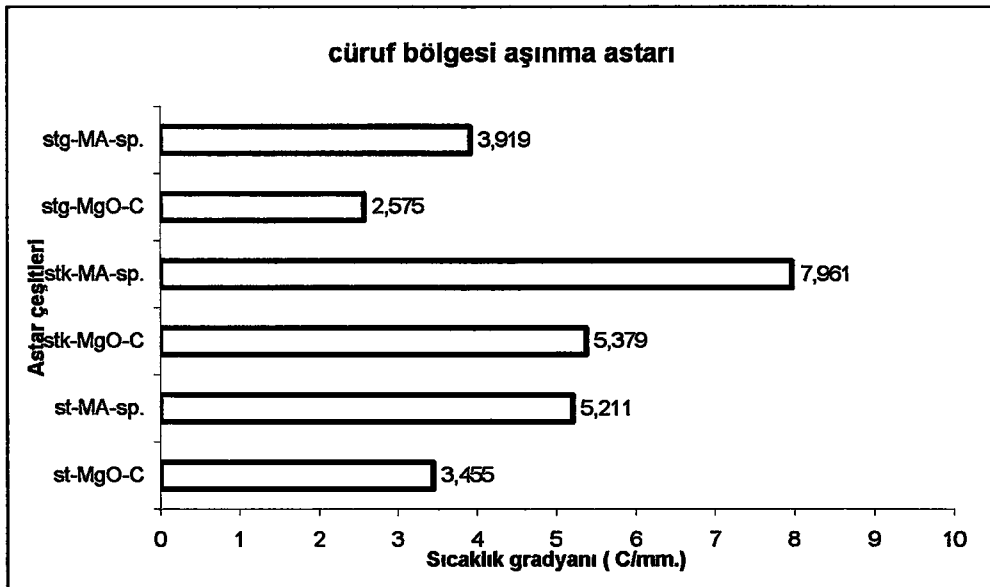
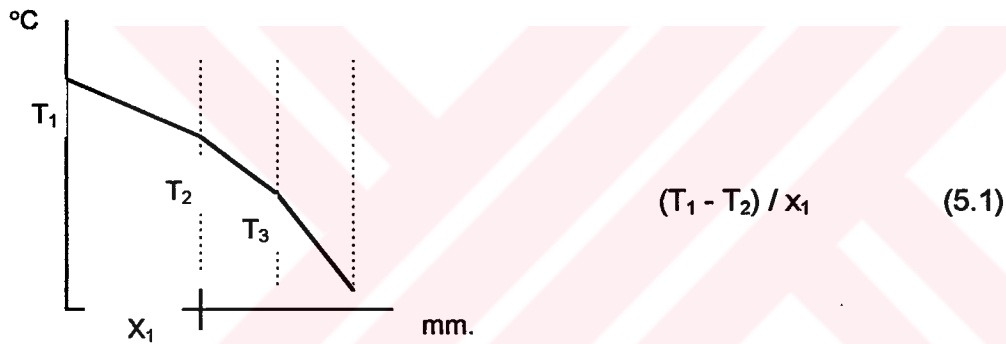


Şekil 5.19 Stg MgO-Al₂O₃-spinel dizaynı refrakter astar duvarındaki sıcaklık dağılımı

Şekil 5.14-5.19'da farklı kalınlık ve türdeki refrakter astar dizaynları içinde; cüruf bölgesi ve sıvı çelik çalışma bölgeleri için sıcaklık dağılımları sonuçları gösterilmiştir.

Refrakter astarın sıcaklık gradyanının, cüruf etkileşimi üzerine etkisi bulunmaktadır. Zira sıvı cüruf ile temasta bulunan refrakter astarın sıcaklığı sayesinde cüruf, eriyik halini sürdürmekte ve böylece korozyona devam etmektedir [56, s 77-83]. Bu olumsuz etkiden kurtulmak için, refrakter astarın sıcaklık gradyanının dik olması tercih edilmektedir.

Eşitlik 5.1 kullanılarak ve Şekil 5.14-5.19'daki cüruf bölgesi aşınma astarı seçilerek, farklı malzeme tiplerinin ve farklı astar boyutlarının cüruf bölgesi aşınma astarı içindeki sıcaklık gradyanları hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar, Şekil 5.20'de gösterilmiştir.



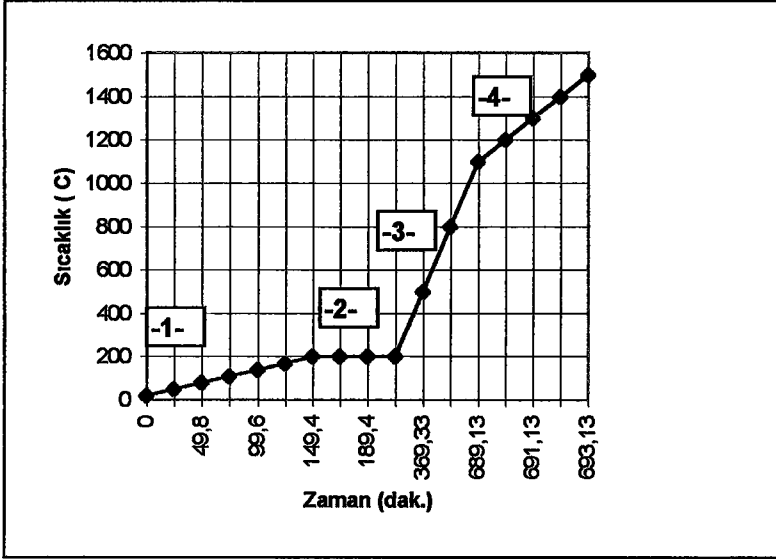
Şekil 5.20 Farklı refrakter türüne ve farklı kalınlıklara sahip astarlardaki sıcaklık gradyanlarının karşılaştırmalı olarak incelenmesi

Şekil 5.20'den de görüldüğü gibi, standart kalınlıktaki MA-spinel astarda $5.2\text{ }^{\circ}\text{C/mm}$ 'lik hızla sıcaklık düşüşü gözlenirken, aynı astar kalınlığına sahip MgO-C astarda $3.4\text{ }^{\circ}\text{C/mm}$ 'lik bir sıcaklık düşüş hızı meydana gelmiştir. Refrakter türü açısından bakıldığında MA-spinel daha dik bir gradyana sahip olduğu görülmektedir.

Farklı astar kalınlıklarına bakıldığında, astar kalınlığı daraldıkça sıcaklık gradyanının dikleştiği gözlenmektedir. Buna göre; $7.96\text{ }^{\circ}\text{C/mm}$. ısı geçiş hızı ile standarttan 0.1 m . daha dar ve MA-spinel aşınma astarlı modelin, en dik sıcaklık gradyanına sahip olduğu görülmüştür.

Sınır koşulu olarak zamana bağlı yapılan hesaplamalardan sonra zamana bağlı olmayan koşulların simulasyonuna geçilmiştir. Zamana bağlı hesaplamalarda sınır koşulu olarak, potanın döküm öncesi ön ısıtmadan geçirilmesi ve daha sonra sıvı çeliğin konverterden potaya aktarılmasına kadar geçen süre içindeki durum ele alınmıştır. Bilindiği gibi potalar, döküm öncesi termal şok etkisini minimuma indirmek için bir ön ısıtma işleminden geçirilmekte ya da sonraki kullanımlarında sıcak tutulmaktadır. Potalardaki sıcaklık ayarlamaları için, sıvı çelik konverterden potaya, kalitesine göre 90°C kadar aşırı bir ısıtma ile dökülmektedir.

Bu sıcaklık, potanın döküme giriş sıcaklığına ve bağlı olarak çok değişiklik göstermektedir. Karıştırma öncesi, istenen sıcaklık 30°C kadar fazla ise potaya hurda slab daldırılıp, argon gazı ile karıştırılarak soğutulur. Bazı durumlarda slab daldırılmaksızın sadece argonla karıştırma yapılarak da sıcaklık ayarlanmaktadır. Böylece yapılan karıştırma işlemi ile pota tabanı ve yanları ile potanın merkezi eşit sıcaklıklara getirilmektedir. Meydana gelen sıcaklık düşüşüne pota refrakterlerinin çalışma sıcaklığına çıkarmak için kaybedilen ısı neden olmaktadır. Bu şekilde pota döküme hazır hale getirilmektedir [57]. Şekil 5.21'de bir potanın döküm öncesi ön ısıtma rejimi görülmektedir.



Şekil 5.21 Sıvı çelik dökümü öncesi potaya uygulanan ön ısıtma rejimi periyodu [47]

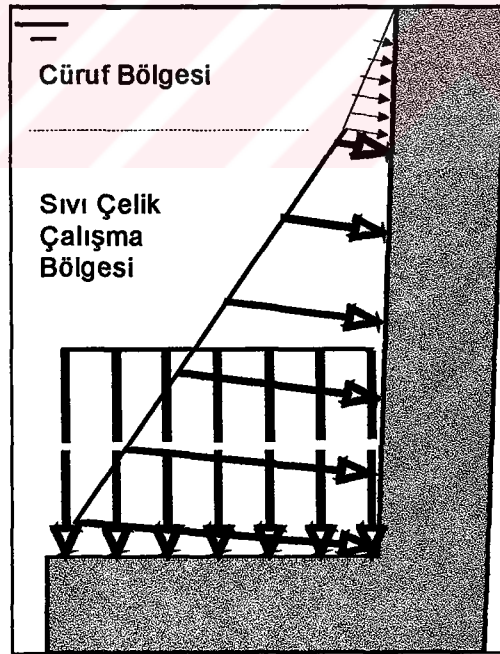
Grafikten de kolayca görülebileceği gibi pota boş olarak; -1- olarak numaralandırılan eğriye göre 200°C'ye 150 dakikada (1.2°C/dak.) ısıtılmaktadır. Burada 60 dakika kadar tutulduktan sonra (-2-), 1100 °C'ye 480 dakikada (1.875°C/dak.) ısıtılmaktadır (-3-). Pota 1100°C'ye ulaştırıldıktan sonra, konverterden sıvı çeliğin potaya dökümü gerçekleşmektedir. Pota tam doluncaya kadar geçen zaman yaklaşık 4 dak.'dır (-4-). Pota içi bu aşamada 1500°C'nin üzerinde bir sıcaklığa ulaşmaktadır.

Zamana bağlı yapılan hesaplamalarda yukarıda bahsedilen sınır koşulları çerçevesinde hesaplamalar gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, MgO-C/MgO refrakterle örülü pota astarının daha çabuk soğuduğu görülmüştür. Zira sıcaklık gradyanı düşüktür. Termal şok etkisini azaltmak için 1100°C'ye kadar ön ısıtma işlemi yapılan bu potalarda, ön ısıtma işleminin verimli olabilmesi, MgO-C/MgO astarlı potanın, MA-spinel astarlı potaya göre daha kısa sürede sıvı çelik dökümüne alınmasını gerektirmektedir.

5.1.3 Mekanik ve termomekanik analizler

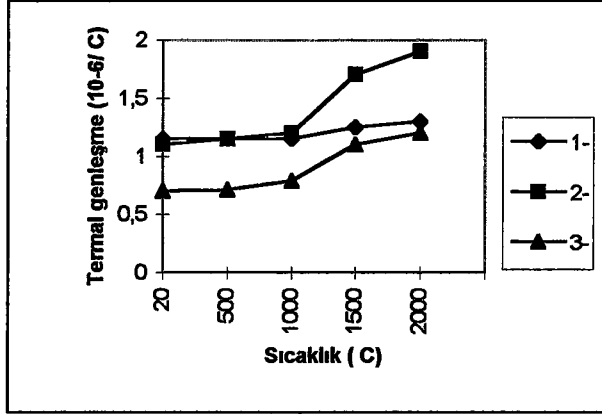
Sıvı çelik döküm potalarının refrakter astarı, çalışma koşulları altında yalnızca termal gerilmelere değil, buna ilave olarak büyük tonajlı kapasiteleri nedeniyle ayrıca mekanik gerilmelere de maruz kalmaktadır. Bu etki, pota dolu durumda olduğu halde, sıvı çelik ve sıvı cürufun astar iç duvarı üzerine yapmış olduğu hidrostatik basınç etkisi olarak tanımlanmaktadır. Şekil 5.22’de simule edildiği gibi ve hidrostatik basıncın tanımı gereği [58], cürufun yoğunluğunun, sıvı çeliğe göre düşük olması dikkate alınmıştır ve pota dibine yaklaşıldıkça basıncın şiddeti artmaktadır. Yapılan analizlerde ilk aşama, hidrostatik basınç sonucu meydana gelen, Bölüm 2.3’te lineer elastik durum için teorik temelleri anlatılmış olan gerilme ve yer değiştirmelerin, pota astarı içinde dağılımlarının hesaplanması olmuştur.

İkinci aşamada ise; refrakter malzemelerin yüksek sıcaklıktaki termal genleşme davranışı sonucu pota astarında meydana gelen gerilme-yer değiştirmeler hesaplanmıştır.



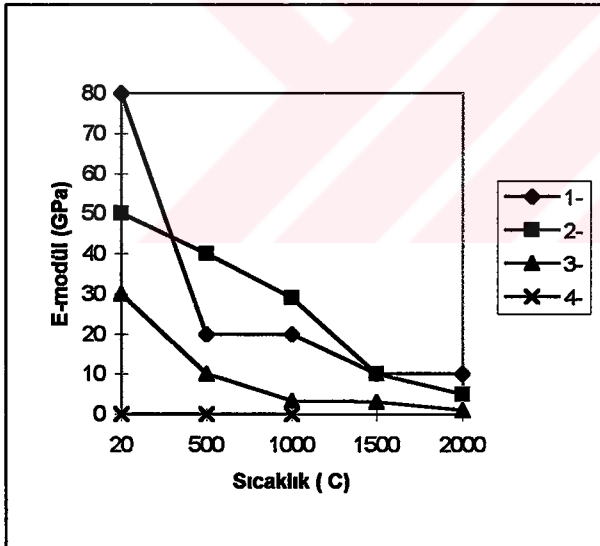
Şekil 5.22 Sıvı çelik ve sıvı cüruf sisteminin pota astar duvarı üzerine uyguladığı hidrostatik basıncın şematik gösterimi

Analizlere başlamadan önce, refrakter malzemelere ilişkin gerekli mekanik ve termomekanik fiziksel özelliklerinin tanımlanması gereklidir. Şekil 5.23-5.26 arasında verilen grafiklerde, her iki dizaynda kullanılan refrakter malzemelerin termal genleşme katsayıları ve elastisite modülü değerlerinin (E-modül) artan sıcaklıkla değişimi görülmektedir.



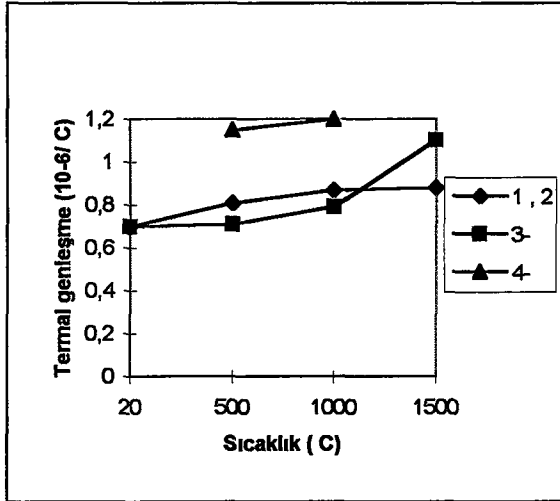
- 1) MgO-C (cüruf bölgesi aşınma astarı)
- 2) MgO (sıvı çelik bölgesi aşınma astarı)
- 3) Emniyet astarı

Şekil 5.23 MgO-C/MgO dizaynı içinde kullanılan refrakterlerin ısı genleşmeleri [49-54]



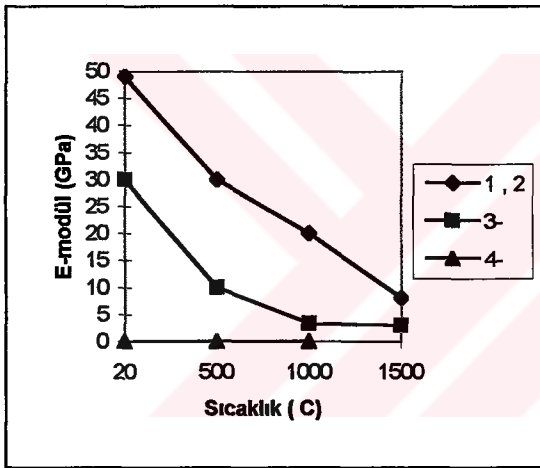
- 1) MgO-C (cüruf bölgesi aşınma astarı)
- 2) MgO (sıvı çelik bölgesi aşınma astarı)
- 3) Emniyet astarı
- 4) İzolasyon astarı

Şekil 5.24 MgO-C/MgO dizaynı içinde kullanılan refrakterlerin E-modül değerleri [30-31, 49-54]



- 1-2) MgO-Al₂O₃-spinel
(cüruf + sıvı çelik böl.
aşınma astarı)
3) Emniyet astarı
4) İzolasyon astarı

Şekil 5.25 MA-spinel dizaynı içinde kullanılan refrakterlerin ısı genleşmeleri [33, 50, 55]



- 1-2) MgO-Al₂O₃-spinel
(cüruf + sıvı çelik böl.
aşınma astarı)
3) Emniyet astarı
4) İzolasyon astarı

Şekil 5.26 MA-spinel dizaynı içinde kullanılan refrakterlerin E-modül değerleri [30-31, 33, 55]

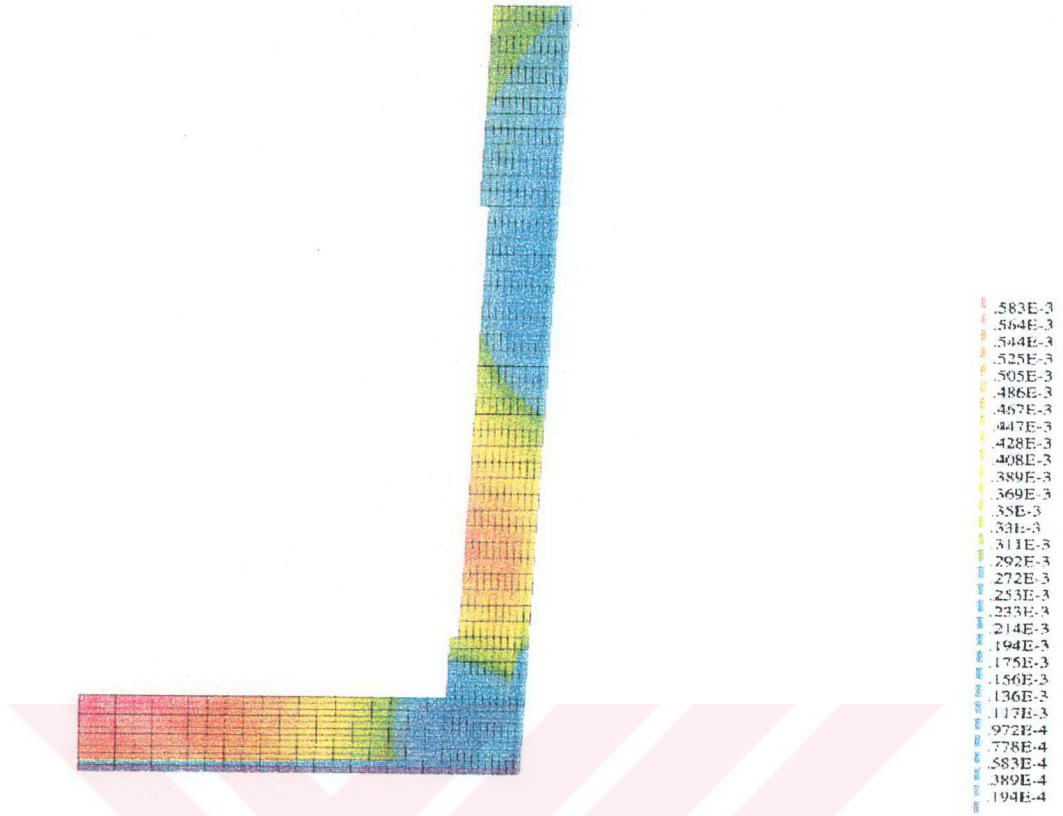
Gerekli özelliklerin tanımlanmasından sonra sınır şartlarının belirlenmesi aşaması gelmektedir. Daha önce de bahsedildiği gibi, sıvı çeliğin konverterden potaya aktarılmasından sonraki durum, hesaplamaların sınır şartlarının belirlenmesinde önemli bir anlam taşımaktadır. Mekanik analizler için iki sınır şartı öngörülmüştür. Bunlardan biri; Şekil 5.22'de görüldüğü gibi, sıvı çelik ve sıvı cüruf sisteminin pota iç astar duvarına yaptığı hidrostatik basınç etkisidir. Burada, pota tabanına inildikçe basıncın şiddeti artmaktadır. Diğer bir başka sınır şartı ise, potanın zemin üzerinde oturuyor olmasıdır. Bu nedenle, pota modelinin tabanla temas halindeki elemanları hiç bir şekilde hareket edemeyecek şekilde sabitlenmiştir.

Termomekanik analizde ise, yüksek sıcaklıklar karşısında refrakter astar duvarının termal genleşme davranışı ele alındığından, pota içi sıcaklığı 1500°C, dış ortam sıcaklığı ise 30°C olarak kabul edilmiş ve hesaplamalar buna göre gerçekleştirilmiştir.

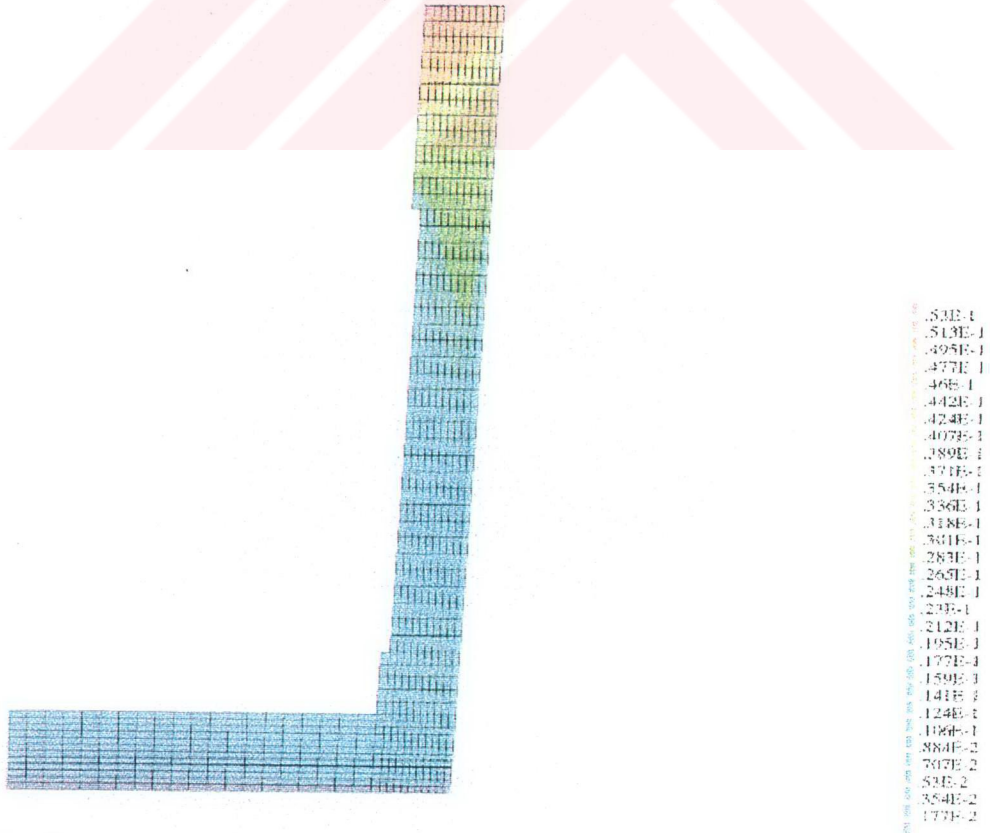
Bütün bu tespitlerle birlikte sonlu elemanlar hesaplamalarına geçilmiştir. Daha önce sıcaklık analizinde olduğuna benzer şekilde, mekanik ve termo-mekanik analizler için de 'FEM Software MISES3' kullanılmış ve programlama gerçekleştirilmiştir. Modüller yardımıyla yazılmış program metni, Ek D'de verilmektedir. Buradaki programlama hidrostatik basınç gerilme-yer değiştirmelerin hesaplanması için gerçekleştirilmiştir. Ancak termal gerilme-yer değiştirmeler için de benzer bir program yapılmıştır. Her iki programlama arasındaki fark yükleme modülü (*load.dat*) içinde kendisini göstermektedir. Bu modül içinde hidrostatik yüklemeler ve termal yüklemeler, Ek D içinde açıklanacağı gibi farklı bir anlayış içinde tanımlanmaktadır.

Yapılan programlama ile standart MgO-C/MgO dizayna ait pota refrakter astarının zamana bağlı olmayan durumdaki mekanik analizi sonuçları elde edilmiştir. Aynı programlama tekniği, stk ile stg ve bunların MgO-Al₂O₃-spinel dizaynına sahip tüm modellere de uygulanmıştır.

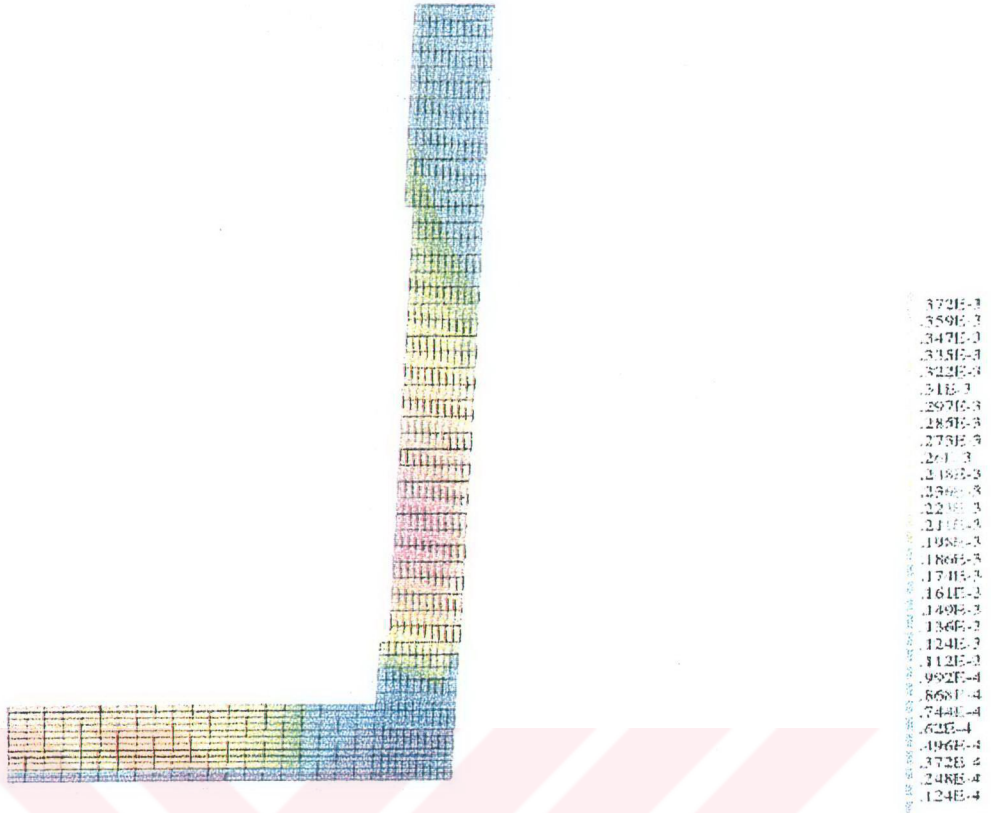
Elde edilen sonuçlar, yine Femgen/Femview altında, fakat bu sefer 'post processing' amaçlı olarak değerlendirilmiştir. Şekil 5.27-5.38'de astar içindeki yer değiştirme miktarlarının dağılımları görülmektedir.



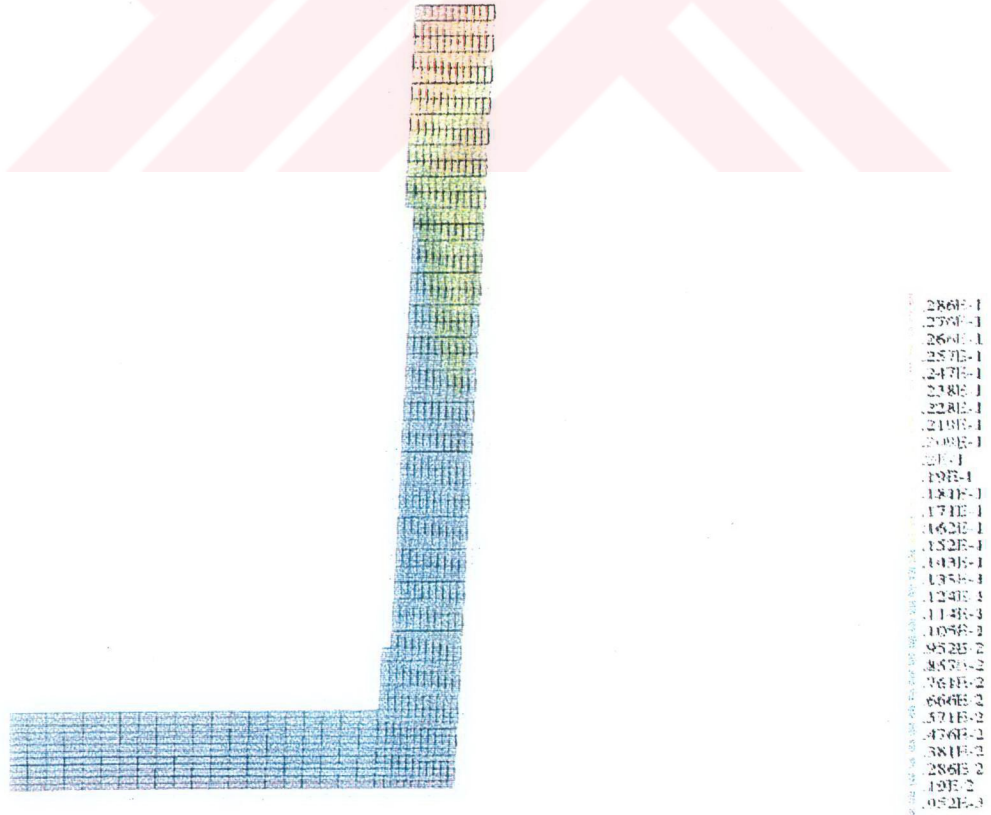
Şekil 5.27 St ve MgO-C/MgO dizaynına ait pota refrakter astarı içindeki hidrostatik basınç nedeniyle meydana gelen elastik yer değiştirmeler



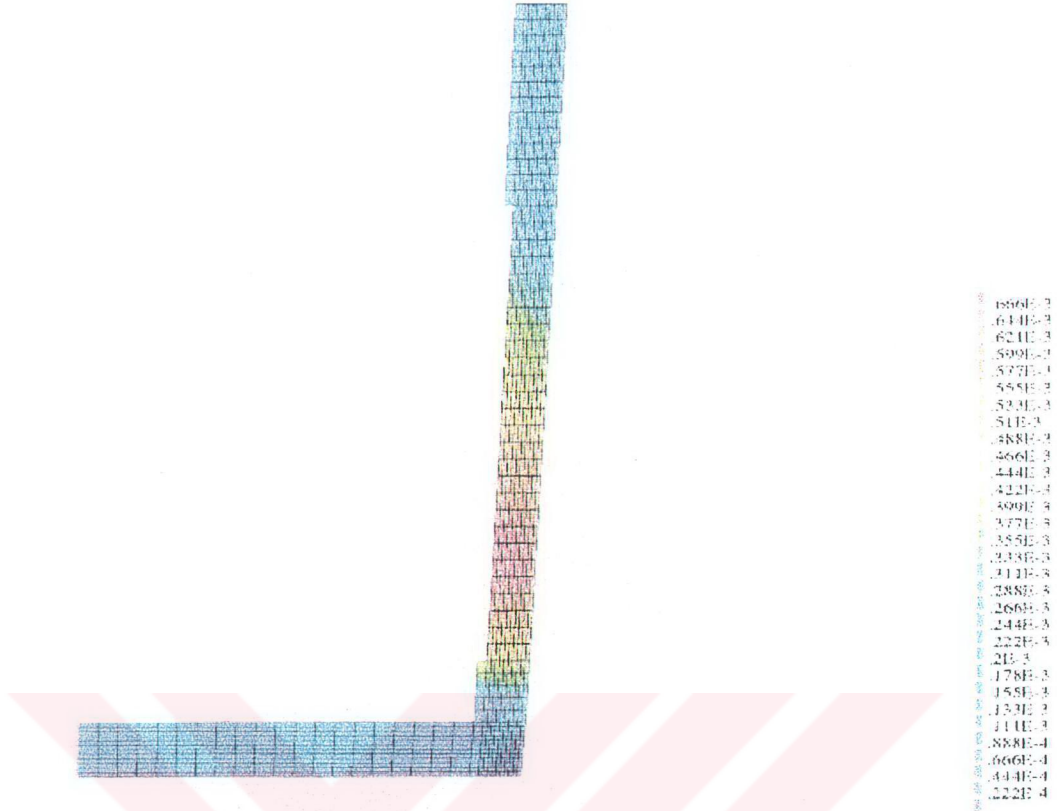
Şekil 5.28 St ve MgO-C/MgO dizaynına ait pota refrakter astarı içindeki termal genişleme nedeniyle meydana gelen elastik yer değiştirmeler



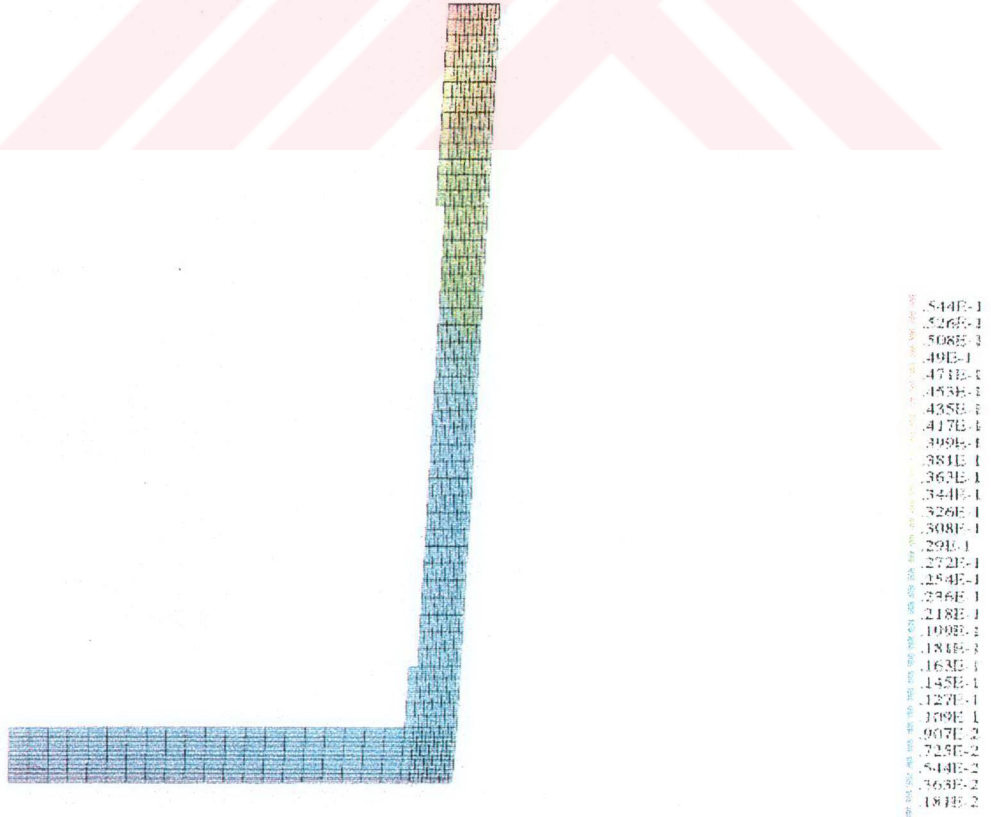
Şekil 5.29 St ve MA-spinel dizaynına ait pota refrakter astarı içindeki hidrostatik basınç nedeniyle meydana gelen elastik yer değiştirmeler



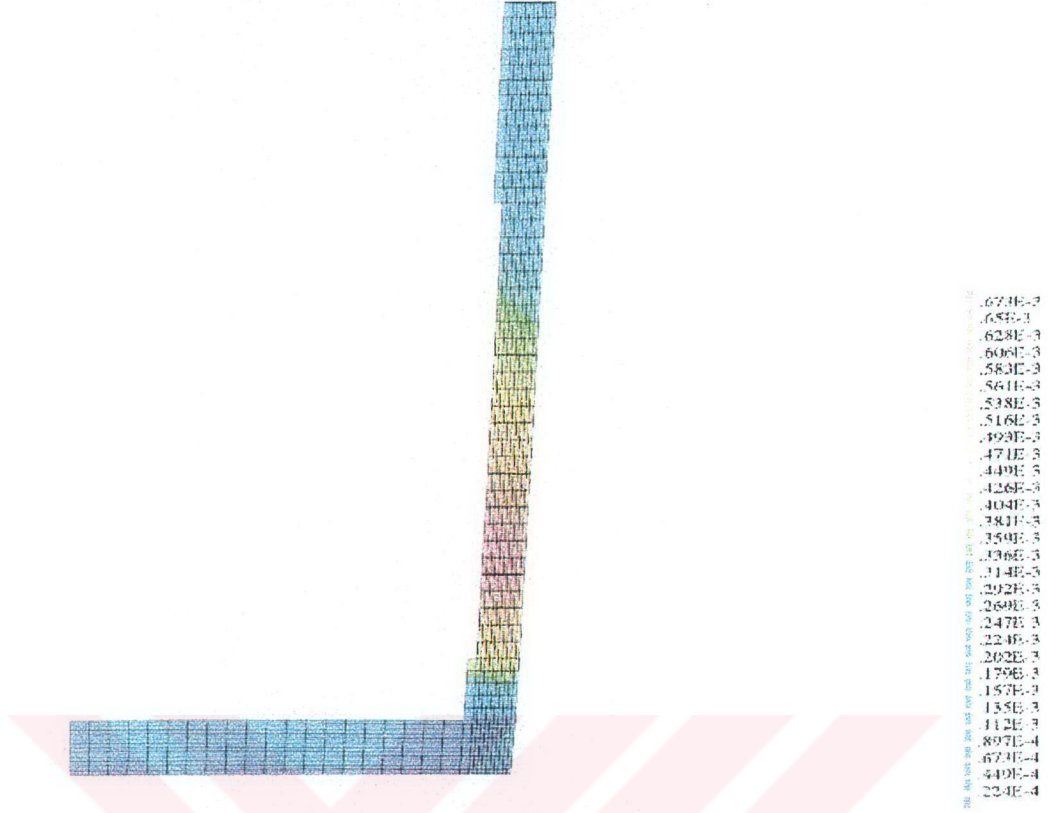
Şekil 5.30 St ve MA-spinel dizaynına ait pota refrakter astarı içindeki termal genişleme nedeniyle meydana gelen elastik yer değiştirmeler



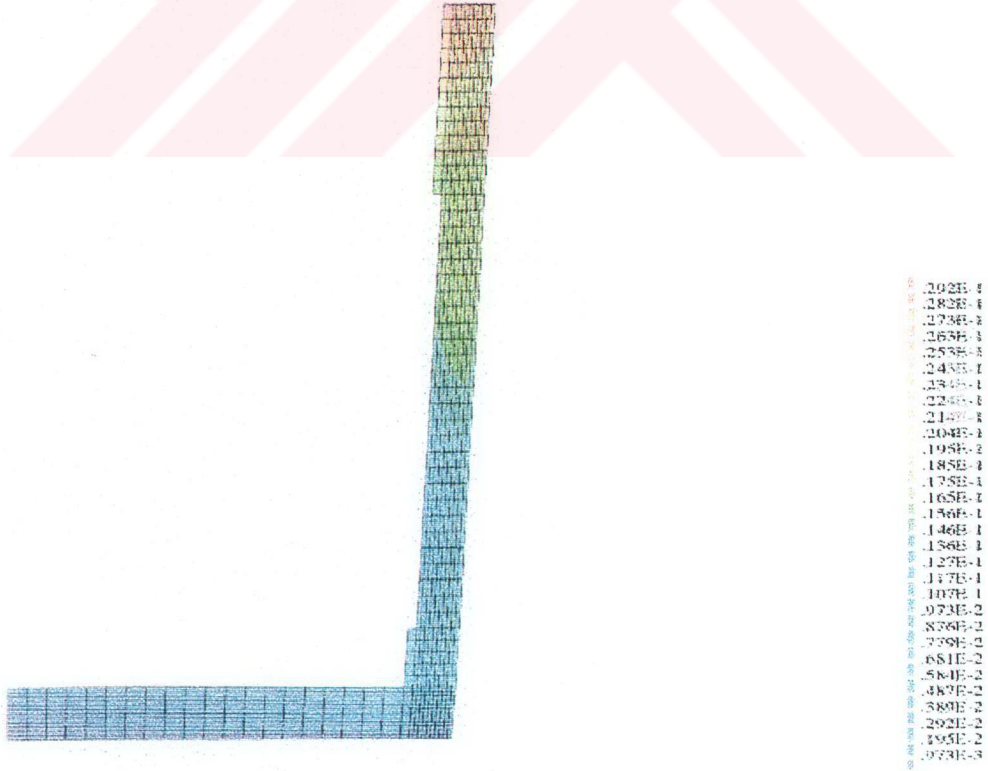
Şekil 5.31 Stk ve MgO-C/MgO dizaynına ait pota refrakter astarı içindeki hidrostatik basınç nedeniyle meydana gelen elastik yer değiştirmeler



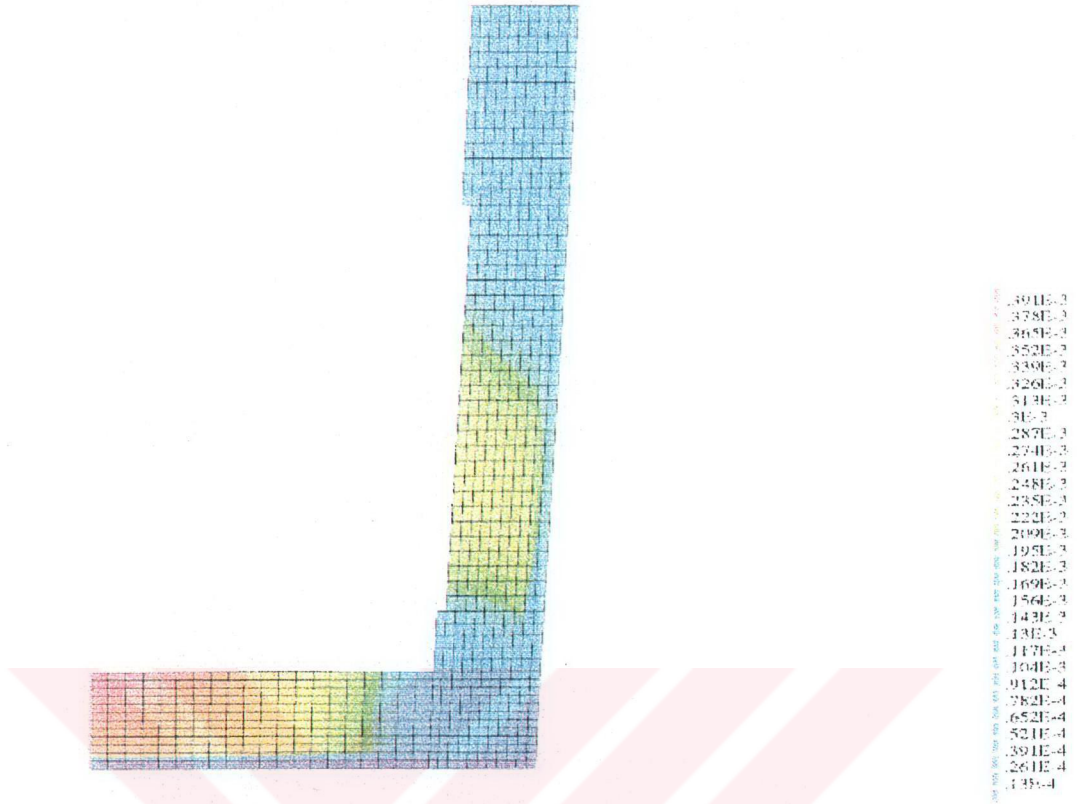
Şekil 5.32 Stk ve MgO-C/MgO dizaynına ait pota refrakter astarı içindeki termal genişleme nedeniyle meydana gelen elastik yer değiştirmeler



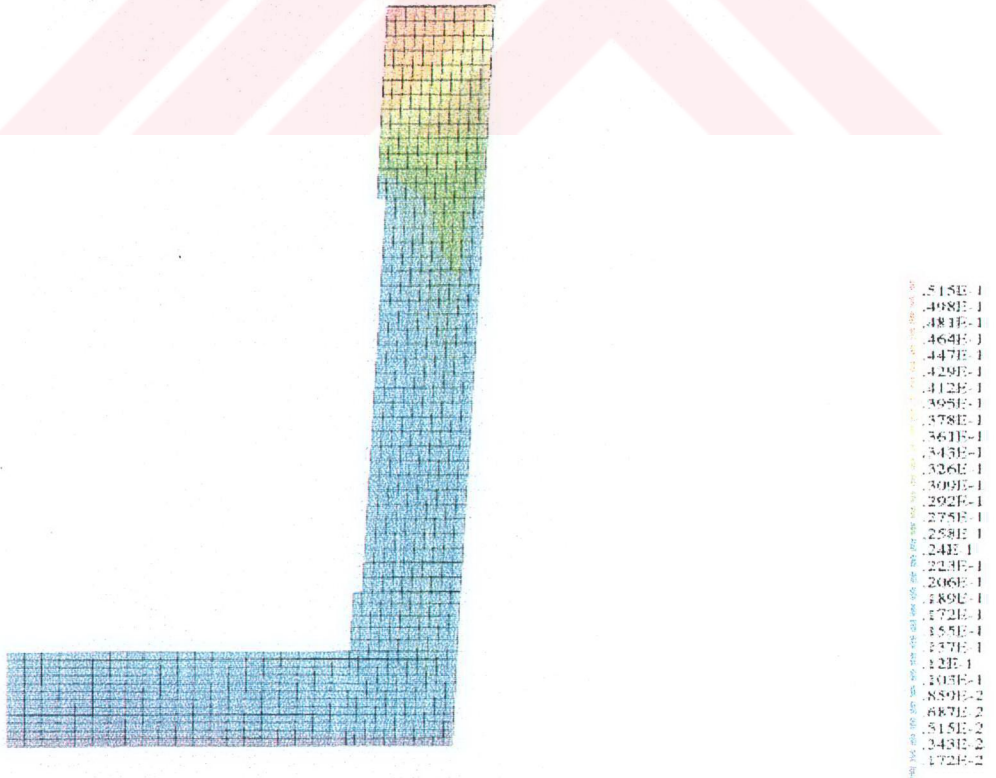
Şekil 5.33 Stk ve MA-spinel dizaynına ait pota refrakter astarı içindeki hidrostatik basınç nedeniyle meydana gelen elastik yer değiştirmeler



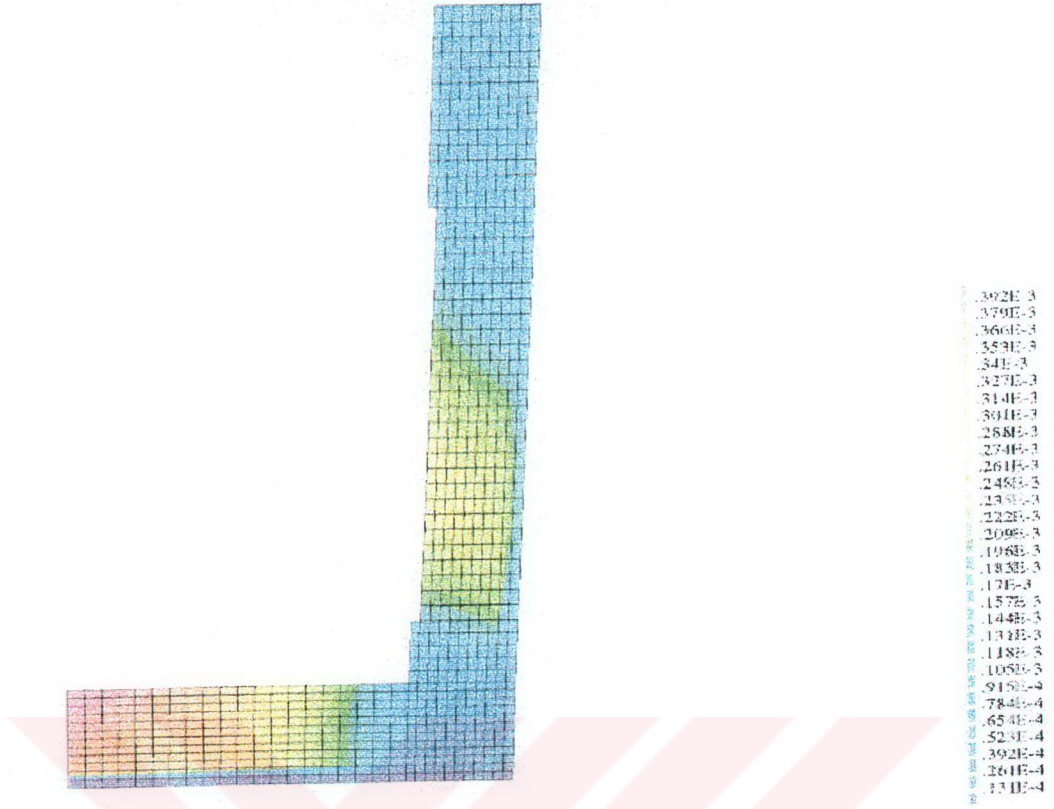
Şekil 5.34 Stk ve MA-spinel dizaynına ait pota refrakter astarı içindeki termal genişleme nedeniyle meydana gelen elastik yer değiştirmeler



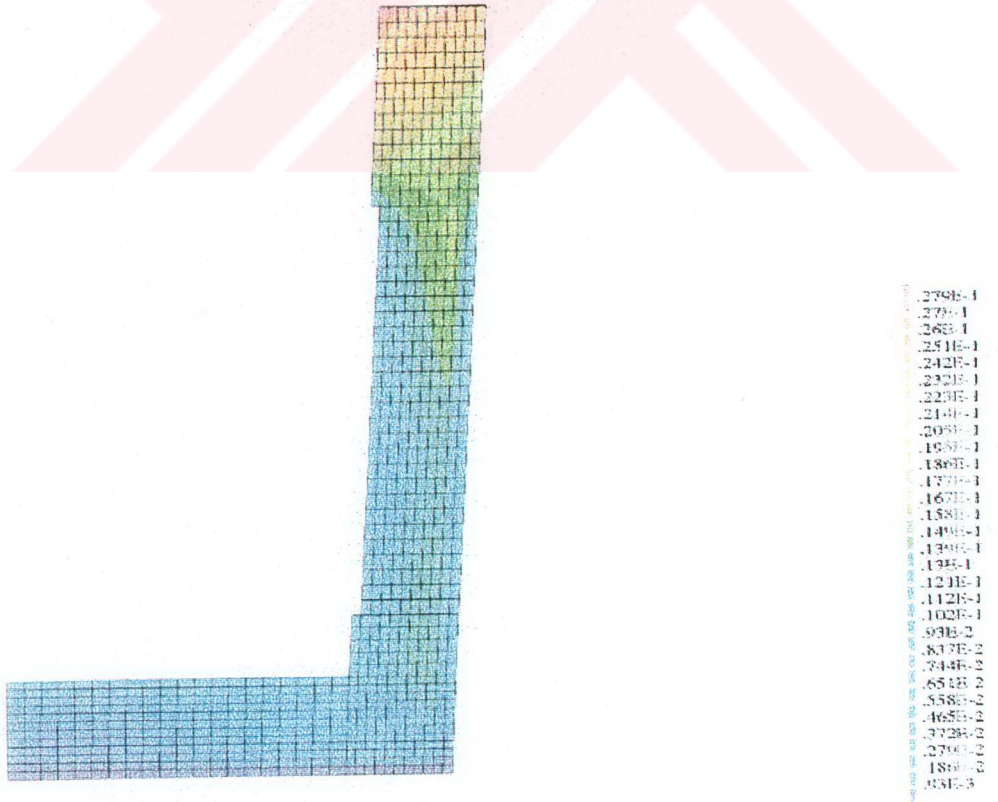
Şekil 5.35 Stg ve MgO-C/MgO dizaynına ait pota refrakter astarı içindeki hidrostatik basınç nedeniyle meydana gelen elastik yer değiştirmeler



Şekil 5.36 Stg ve MgO-C/MgO dizaynına ait pota refrakter astarı içindeki termal genişleme nedeniyle meydana gelen elastik yer değiştirmeler



Şekil 5.37 Stg ve MA-spinel dizaynına ait pota refrakter astarı içindeki hidrostatik basınç nedeniyle meydana gelen elastik yer değiştirmeler



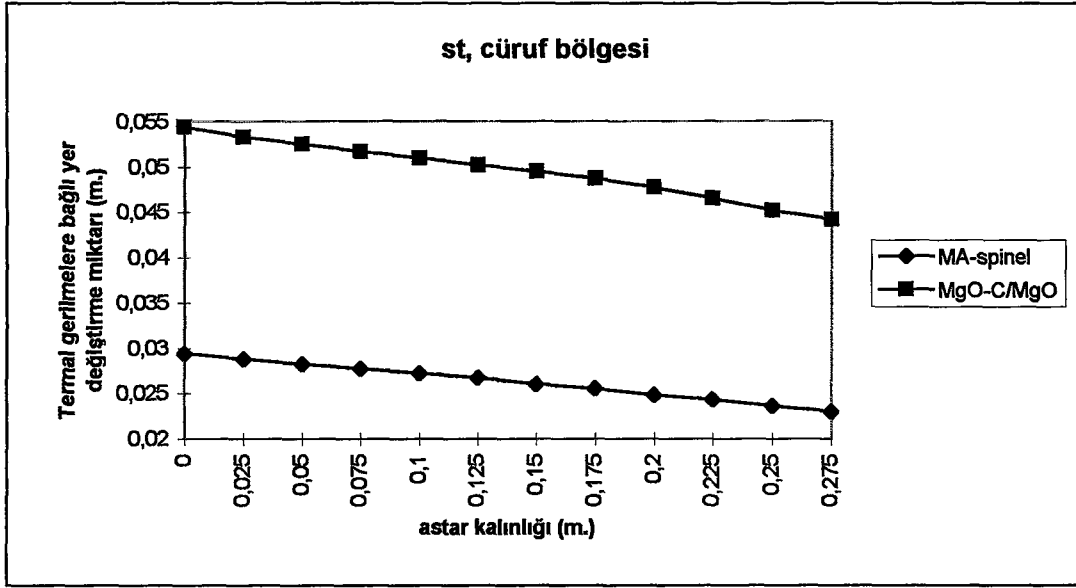
Şekil 5.38 Stg ve MA-spinel dizaynına ait pota refrakter astarı içindeki termal genişleme nedeniyle meydana gelen elastik yer değiştirmeler

Sonuçlardan da açıkça görülebileceği gibi, termal genişleme sonucu meydana gelen yer değiştirmeler, hidrostatik basınç nedeniyle meydana gelen yer değiştirmelerden çok daha fazladır ve dikkate alınması bakımından büyük önem taşımaktadır. Hidrostatik basınç sonucu oluşan en yüksek gerilmeler, beklendiği gibi pota astarı duvarının alt kısmına doğru yoğunlaşmaktadır. Fakat bu bölgelerde termal genişmeler sonucu oluşan gerilmeler, yine de çok daha etkilidir. Cüruf bölgesinin üst kısmında, köşe bölgelerde termal genişleme sonucu oluşan yer değiştirmelerin maksimum olduğu gözlenmektedir. Cüruf bölgesi üst kısmında x- ve y-yönlerinde termal genişmeler sonucu yüksek oranda elastik deformasyona uğramaktadır. Düşük hidrostatik gerilmelerin maksimum olduğu sıvı çelik çalışma bölgesi duvarındaki elastik şekil değiştirmeler termal gerilmeler sonucu oluşan elastik şekil değiştirmenin yönüyle aynıdır. Tabanda ise, bu iki gerilmenin yönü ters olmakla birlikte, termal gerilme sonucu elastik şekil değiştirme burada da hakim konumdadır.

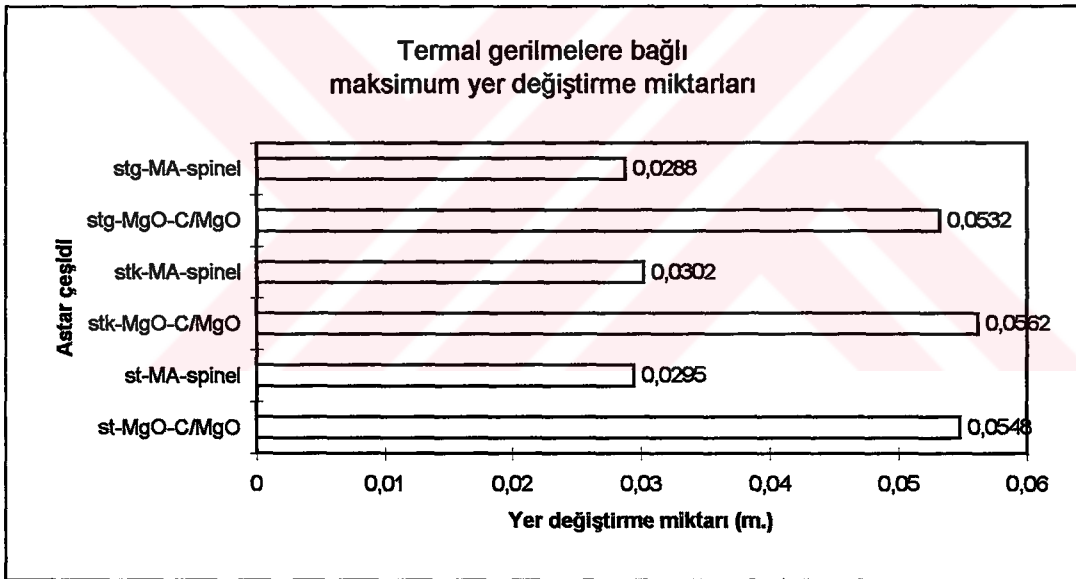
Şekil 5.39'da hidrostatik basınç gerilmesi etkisinde pota astarında meydana gelen elastik deformasyonun, 5.40'ta ise termal gerilmeler sonucu meydana gelen elastik şekil değiştirmenin simülasyonu sergilenmiştir.

durumunda, daha sonra refrakter astarda arzu edilmeyen çatlamalar ve parçalanmalar gibi büyük sorunlara neden olmaktadır. Bu nedenle maksimum termal gerilmelere bağlı yer değiştirmelerine bakılarak, MgO-C ve MA-spinel refrakter malzemeleri karşılaştırılmıştır. Şekil 5.41’de maksimum termal gerilmelerin gözlemlendiği cüruf bölgesinde astar boyunca yer değiştirme miktarının değişimi sonuçları verilmiştir. MgO-C ile MA-spinel refrakter malzemelerinin astar içindeki termomekanik performansları, burada açık bir şekilde sergilenmektedir. Buna göre 1500 °C’de; MgO-C refrakterle örülü astar, maksimum 0.55 m. ötelenmeyle yer değiştirirken, MA-spinelli astar aynı şartlarda 0.03 m. yer değiştirmiştir. Bu sonuçla birlikte; MgO-C astarında meydana gelen maksimum yer değiştirmeler, yaklaşık iki kat daha fazla olup, MA-spinele göre daha az mukavemet göstermiştir. Bu durum, yüksek sıcaklıklarda çalışma sırasında pota astarı için daha fazla riski ifade etmektedir. MgO-C/MgO astarların tuğla refrakterlerle örülü olduğu düşünüldüğünde, her bir tuğlanın boyuna ve enine olmak üzere üç boyutlu genleşme etkisi de göz önüne alınırsa, riskin büyüklüğü daha da netleşmektedir. Tuğla örümü sırasında yanyana/üstüste bulunan tuğlalar arasında bu genleşmenin olumsuz etkilerine karşı önlem olarak belirli oranda pay bırakılması ve meydana gelen boşlukların ise yabancı bir dolgu maddesiyle doldurulması gerekmektedir. Oysa dökümle şekillendirilen MA-spinel pota astarı, hem yüksek sıcaklıktaki mukavemeti nedeniyle daha az risk taşımakta, hem de prosesi gereği bu tür olumsuzlukların daha az yaşanmasına neden olmaktadır.

Farklı kalınlıklardaki astarlarda meydana gelen maksimum yer değiştirme miktarları ise Şekil 5.42’deki grafikte gösterilmiştir.



Şekil 5.41 Standart pota astarı cüruf bölgesi içinde termal gerilmelere bağlı yer değiştirme miktarının astar boyunca değişimi



Şekil 5.42 MgO-C/MgO ve MA-spinel ile bunların farklı kalınlıklardaki astarlarında termal gerilmeler sonucu oluşan maksimum yer değiştirmeler

Astar kalınlığına bağlı olarak yapılacak bir değerlendirmede, -beklendiği gibi- astar kalınlığı arttıkça maksimum yer değiştirme miktarı azalmakta, yani mukavemet artmaktadır. Ancak sonuçlara bakıldığında üç astarın da birbirine çok yakın miktarlarda elastik şekil değiştirmeye uğradıkları oldukları ve fazla bir ayrım yapılamayacağı söylenebilir.

6 MgO, MgO-C TUĞLA ve MgO-Al₂O₃-spinel DÖKME REFRAKTERLER ÜZERİNE YAPILAN DENEYSEL ÇALIŞMALAR ve SONUÇLARI

Bu çalışmada, Bölüm 5'te SE-analizleri yardımıyla termal, mekanik ve termomekanik özellikleri incelenen, sıvı çelik döküm potası bazik dizaynı içinde aşınma astarı çalışma bölgesinde kullanılan, magnezit (MgO) ile cüruf bölgesinde kullanılan magnezit-karbon (MgO-C) refrakter tuğlalar ve bunlara alternatif olarak geliştirilmesi düşünülen, magnezya-alümina-spinel (MgO-Al₂O₃-spinel ya da MA-spinel) dökme refrakterlerinin, Bölüm 4'te geniş olarak anlatılan mekanik/termomekanik özellikleri deneysel olarak araştırılmıştır.

Yapılan deneysel çalışmalar ile önce refrakter malzemeler üretilmiş, daha sonra fiziksel ve kimyasal özellikleri belirlenerek, özellikle çelik potalarında kullanılmakta olan MgO ve MgO-C tuğla refrakterlerle, buna alternatif olması amaçlanan MA-spinel dökme refrakterler kıyaslanarak, avantaj ve dezavantajlarıyla birlikte incelenmeye çalışılmıştır.

6.1 Çalışmalarda Kullanılan Refrakter Malzemeler ve Hazırlanışı

6.1.1 Magnezit ve magnezit-karbon refrakter hammaddeleri, kimyasal bileşimleri ve numunelerin hazırlanışı

Bu çalışmada; magnezit refrakter tuğlaları (MgO) olarak Söğüt Refrakter Malzemeler San. ve Tic. A.Ş.'den temin edilen %97 MgO içeren SÖRK-M97 kalite magnezit refrakter tuğlaları kullanılmıştır. Tablo 6.1'de bu tuğlalara ait kimyasal bileşim özellikleri görülmektedir.

Tablo 6.1 Magnezit refrakterin kimyasal bileşimi (%)

	MgO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO
SÖRK-M97	97.0	1.0	0.1	0.2	1.6

Magnezit-karbon (MgO-C) refrakter tuğlaları olarak ise SÜPERATEŞ Refrakter San. ve Tic. A.Ş. ile müşterek geliştirilerek üretilen ve sırasıyla, %5, %10, %15 grafit katkılı magnezit refrakter tuğlaları kullanılmıştır. Magnezitin hammadde kaynakları ve refrakter malzeme üretimine sevkedilinceye kadarki işlemler, Bölüm 3.3.1'de geniş olarak anlatılmıştır. Çalışmada MgO-C tuğlaların üretiminde hammadde olarak, Kütahya Magnezit A.Ş. üretimi 1. kalite sinter magnezit, Dead Sea Periclase Ltd., İsrail üretimi deniz suyu sinteri ve Q MAG-Avustralya üretimi ergimiş (fused) magnezit kullanılmıştır. Farklı tane boyutuna sahip magnezitler, Tablo 6.2'de görülen 8 ayrı fraksiyona ayrılarak sınıflandırılmıştır. Tablo 6.3-6.5'te farklı hammadde kaynaklarından gelen magnezitlerin kimyasal özellikleri verilmiştir.

Tablo 6.2 Deneylerde kullanılan magnezitin tane iriliği fraksiyonları

- 6.3 + 4 mm	- 0.5 + 0.25 mm
- 4 + 2 mm	- 0.25 + 0.14 mm
- 2 + 1 mm	- 0.14 + 0.063 mm
- 1 + 0.5 mm	- 0.063 mm

Tablo 6.3 KÜMAŞ orijinli sinter magnezitin kimyasal bileşimi (%)

MgO	SiO ₂	CaO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O	A.Z.
95.5	1.4	2.2	0.2	--	0.2	--	0.5

Tablo 6.4 Deniz suyu sinter magnezitin kimyasal analizi (%)

MgO	CaO	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	B ₂ O ₅
99.20	0.70	0.03	0.04	0.03	0.20

Tablo 6.5 Ergimiş magnezitin kimyasal analizi (%)

MgO	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃ + Cr ₂ O ₃	B ₂ O ₅
97.00	2.40	0.45	0.15	0.001

Deniz suyu sinterinde kristal boyutu, 70-90 µ'a kadar uzanırken, ergimiş magnezitte kristal boyutu, 800-1100 µ'u bulmaktadır.

MgO-C refrakterlerin üretiminde karbon kaynağı olarak kullanılan grafit, minimum %94 C içeren Çin kaynaklı pul şeklindeki grafitir. Grafitin karakterizasyonu için tane iriliği dağılımı, Tablo 6.6 ve grafitin 1000°C'de yakıldıktan sonraki külünün kimyasal analizi, Tablo 6.7'de verilmiştir.

Tablo 6.6 MgO-C tuğla üretiminde kullanılan pul grafitin tane iriliği dağılımı

Elek Açıklığı (mm.)	Ağırlık Yüzdesi
+ 0.5	00.76
-0.5 + 0.25	14.02
-0.25 + 0.14	80.68
-0.14 + 0.063	03.79
-0.063	00.75

Tablo 6.7 Grafit külünün kümyasal analizi (%)

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	TiO ₂
47.67	24.27	23.20	0.68	2.50	0.56	0.52	0.50

MgO-C refrakterlerin üretiminde bağlayıcı reçine olarak, Bakelite Firması'nın üretimi, fenol novalak tipi bağlayıcı reçine kullanılmıştır. Reçinenin karakterizasyonunu belirlemek amacıyla uçucu madde tayini yapılmıştır. Bunun için bir kap içine konulan ~20 g. reçine, 4 saat 200°C'de fırında bekletilmiştir. Uçucu maddelerin uzaklaşması sonrasında kap içinde siyah süngersi bir artık olduğu gözlenmiştir. Bu maddenin ağırlık tespitinden sonra, uçucu maddenin %29 olduğu ve reçinenin %71 karbon esaslı katı madde içerdiği bulunmuştur.

MgO-C üretiminde antioksidan madde olarak, Ecka Firması üretimi %99 saflıkta ve <45µ tane iriliğine sahip alüminyum ve silisyum metal tozları ve Merck Firması üretimi, %99.9 saflığa ve ortalama 100-300µ tane boyutuna sahip magnezyum metal tozları kullanılmıştır.

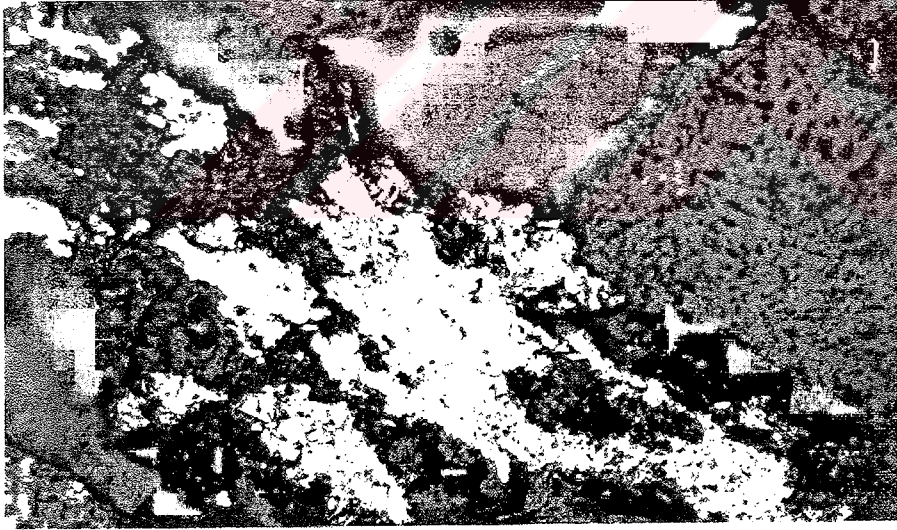
MgO-C refrakter tuğlaların şekillendirilmesi, 'magnezit-grafit-reçine'den oluşan homojenize edilmiş karışımların preslenmesine dayanmaktadır. Tuğlaların soğukta basma mukavemetinin maksimum olabilmesi ve cürufu bünyesine sızdırmaması için düşük poroziteye sahip olması gereklidir. Granülasyon işlemi yapılarak optimum tane boyutu dağılımına sahip toz karışımlarının preslenmesi, porozitenin minimumda tutulmasına önemli katkı sağlamaktadır. Buna göre Tablo 6.7'de verilen tane fraksiyonlarında ve yüzde oranlarındaki ve sırasıyla %5, %10 ve %15 grafit içeren üç ayrı magnezit-grafit hammaddesi (Tablo 6.8) tartılıp, karıştırıldıktan sonra bu karışımlara %3 oranında reçine ilave edilmiştir. Magnezit ve grafit, reçine ile homojenize edildikten sonra hazırlanan karışımlar, 1300 (10⁴.kg/m²)'lik basınç altında uygun kalıplarda preslenmiştir. Bu basınç değeri, hem porozite hem de hacim ağırlığı açısından optimum basınçtır. Presleme sonrası grafit pulları deforme

olup, magnezit tanelerinin etrafını sarmaktadır. Böylece MgO taneleri arasındaki boşluk, pul şeklindeki grafit taneleriyle doldurularak, hem porozite azaltılmakta hem de taneler arasında bir bütünlük ve süreklilik sağlanmaktadır. Şekil 6.1’de MgO tane sınırlarına yerleşmiş pulsu grafitli bir yapının optik mikroskop görüntüsü verilmiştir. Grafit fazı içerisinde grafit pulları, dikey konumda olduğu bölgelerde parlak görünmektedir.

Tablo 6.8 MgO-C refrakter tuğlaların kimyasal bileşimleri (%)

	MgO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO
%5C-MgO	98.27	0.54	0.44	0.39	0.25
%10C-MgO	98.14	0.59	0.46	0.43	0.28
%15C-MgO	98.04	0.63	0.48	0.46	0.31

Tuğlalar şekillendirildikten sonra, 200°C’de kurutularak mevcut nem giderilmiş ve aynı sıcaklıkta temperlenerek mukavemet kazanması sağlanmıştır. Daha sonra çeşitli fiziksel ve kimyasal testlerin yapılabilmesi için tuğla istenilen ölçülerde elmas testere yardımı ile kesilerek numuneler hazır hale getirilmiştir.



Şekil 6.1 MgO tanelerinin etrafını sarmış grafit pullarının genel görünümü (200x)

6.1.2 Magnezya-Alümina-spinel dökme refrakter hammaddeleri, kimyasal bileşimleri ve numunelerin hazırlanışı

Yeni geliştirilmekte olan ve özellikle sıvı çelik potalarında magnezit ve magnezya-karbon refrakter tuğlalara alternatif oluşturması düşünülen magnezya-alümina-spinel (MA-spinel) dökme refrakterlerin hammaddeleri, Bölüm 3.3.2, Şekil 3.11'de belirtildiği gibi, ALCOA Firması tarafından üretilmiştir. Buna göre; MgO ve Al₂O₃ hammaddeleri birlikte ön öğütme işleminden geçirilerek, granüle edilmektedir. Bunu kurutma, sinterleme, soğutma işlemleri ve son olarak da kırma, öğütme işlemi izlemektedir. Deneylerde; ALCOA tarafından üretilmiş AR78 kalitesindeki spinel tozları ile Bölüm 3.3.2'de tanımlandığı gibi iri-yassı alümina kristallerine sahip T60 kalitesindeki tabular alümina temel hammaddelerinin yanı sıra mikron seviyesinde çok ince taneli olarak üretilmiş reaktif alümina (CLC370C kalite), bağlayıcı olarak çimento (SECAR71 kalite) ve tozların sıvı içerisinde iyi disperse olmalarını sağlamak için kalgon maddesi kullanılmıştır. Temel hammaddelerin kimyasal bileşimleri Tablo 6.9 içinde verilmektedir.

Tablo 6.9 MA-spinel numunelerin üretiminde kullanılan ALCOA ürünü hammaddelerin kimyasal bileşimleri (%)

	Al ₂ O ₃	MgO	CaO	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Na ₂ O
tab. alümina (T60)	>99.40	---	<0.08	<0.06	<0.03	---
MA-spinel (AR78)	<78.00	22.00	<0.30	<0.06	<0.13	---
çimento (SECAR71)	73.00	<0.50	26.00	<0.80	<0.30	<0.09

METAMİN A.Ş ile müşterek yapılan çalışmalarda deneylerde kullanılmak üzere içerdiği tabular alümina miktarına bağlı olarak; tabular alümina içermeyen, %43 tab. alümina içeren ve %60 tab. alümina içeren üç çeşit MA-spinel dökme refrakter numunesi üretilmiştir. Bu numunelerin üretilmesi için, Tablo 6.10'da verilen oranlarda bir toz karışımı hazırlanmıştır. Karışıma giren tozların tane boyutu fraksiyonları en uygun paketlenmeyi sağlayacak şekilde granüle edilmiştir. Burada kullanılan reaktif alümina ile döküm harcının kalıp içi akıcılığını arttırmak başta olmak üzere, kullanılması gerekli su oranının azaltılması, döküm sonrası kalınlık alma aşamasında sıkı paketlenmeyi ve kalıba tam yerleşmeyi sağlaması amaçlanmıştır. Ayrıca reaktif alümina, sinterlenmeyi hızlandırması ve sıcakta dayanım sağlaması bakımlarından da yararlı olmaktadır. Elde edilen yeni karışımlara uygulanan sulu elek analizleri sonuçları ve kimyasal bileşimleri Tablo 6.11 ve 6.12'de verilmiştir.

Tablo 6.10 MA-spinel dökme refrakter numunelerinin hazırlanmasında kullanılan karışımların reçeteleri (%)

	Tabular alümina	MA-spinel	Reaktif alümina (CL370C)	Çimento (Secar71)	Dispersan (calgon)
TA00	---	87.0	8.0	5.0	0.1
TA43	43.0	44.0	8.0	5.0	0.1
TA67	67.0	20.0	8.0	5.0	0.1

Tablo 6.11 MA-spinel numunelerinin elek analizi sonuçları

Elek Açıklığı (mm.)	Ağırlık Yüzdesi (%)		
	TA00	TA43	TA67
-6 +3	20.0	30.0	25.3
-3 +1	32.0	18.6	23.1
-1 + 0.5	11.0	13.8	14.2
-0.5	37.0	37.4	37.4

Tablo 6.12 MA-spinel refrakterlerin kimyasal bileşimleri

(%)	Al ₂ O ₃	MgO	CaO	SiO ₂	Fe ₂ O ₃
TA00	79.1	19.1	1.6	0.1	0.07
TA43	88.5	9.7	1.6	0.1	0.06
TA67	93.7	4.4	1.6	0.1	0.05

Bir mekanik karıştırıcı içinde önce kuru olarak karıştırılmış numunelere ardından %5 su ilave edilerek yaklaşık 5 dakika kadar daha karıştırma işlemine devam edilmiştir. Son derece hızlı ve kısa süre içinde reolojik özellikler bakımından döküme hazır hale getirilen harç, bekletilmeden döküme alınmıştır. Döküm için kullanılan kalıplar, çelikten yapılmıştır ve yapılacak deneysel çalışmanın amaçlarına göre; mekanik testler ve cüruf testleri için kübik, yük altında refrakterlik testi için silindirik olarak tasarlanmıştır. Çelik kalıplar, ilk yatırım masrafı bakımından pahalı gözükse de kullanım ömrünün uzun olması nedeniyle ekonomik olmaktadır. Hazırlanan çelik kalıplar, titreşim sağlayıcı masalar üzerine sabitlendirilmiştir. Titreşimli masalar, 3000 devir/dakika devirle titreşmektedir. Döküm işlemi başladığında, masalar titreşir durumda tutulmuştur. Böylece ilk döküm harcı kalıp içine girdiğinden itibaren, titreşimin etkisiyle kalıp içerisinde yerleşmeye başlamış ve bu şekilde kalıp tamamen doldurulmuştur. Titreşir halde bir müddet beklenerek özellikle katı fazın iyice yerleşmesi ve sıvı fazın dışarı atılması sağlanmış, oluşan boşluklar yeniden çamurla doldurulmuştur. Titreşim bu işlem sonrasında da sürdürülerek, bu kez yapı içindeki hapsolmuş kabarcıkların dışarı atılarak katılaşmanın başlaması sağlanmıştır. Titreşim yaklaşık 4 dakika sürdürülmüştür. Döküm sonrası kalıplar, oda

sıcaklığında bekletilerek, çamurun katılaşıp kuruması sağlanmıştır. Daha sonra etüv içinde 105 °C'de ve 24 saat bekletilmek suretiyle tam kuruması sağlanmıştır.

Tüm numuneler hazır hale getirildikten sonra, mekanik ve termomekanik testlere geçilmiştir.

6.2 Refrakter Malzemelerin Fiziksel Özellikleri

6.2.1 Porozite tayini

Refrakter numunelerin poroziteleri, Bölüm 4.2.1'de bahsedildiği gibi, DIN 51056'ya uygun olarak belirlenmiştir. Buna göre, 50 mm. kenar uzunluğuna sahip küp şeklindeki numuneler hazırlanmıştır. MgO ve MgO-C refrakter numuneleri, elmas kesici ile tuğlalardan kesilirken, MA-spinel numuneler, daha önceden hazırlanmış kalıplara dökülerek şekillendirilmiştir.

Numuneler, etüvde 105°C de kurutulup, kuru ağırlıkları tespit edildikten sonra, içi su dolu bir kap içine yerleştirilmiştir. Numunelerin, su içinde kabın tabanı ile temas etmemesi gerektiğinden kabın dibine bir ızgara yerleştirilmiştir. Bu şekilde suya gömülü olan numuneler, kap içinde 4 saat süreyle kaynatılmıştır. Kaynatma sonrası, kap içindeki suyun oda sıcaklığına soğuması beklenmiş ve sonra numuneler dışarıya alınmıştır. Yaş tartım yapılmadan önce numune yüzeylerindeki ince su filmi tabakası, nemli bir bez yardımıyla arındırılmıştır. Son olarak numunelerin yaş ağırlıkları ölçülmüş ve Eşitlik 6.1 yardımıyla görünür porozite değerleri saptanmıştır. Eşitlik 6.2 yardımıyla ise refrakterlerin %su emme miktarları tespit edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, Tablo 6.13'te verilmektedir.

$$\% \text{ Görünür Porozite} = (M_D - M_K) / (M_D - M_A) * 100 \quad (6.1)$$

M_D : su ile doymuş ağırlık (g.)

M_K : kuru ağırlık (g.)

M_A : askı ağırlığı (g.)

$$\% \text{ Su Emme} = (M_D - M_K) / (M_K) * 100 \quad (6.2)$$

Tablo 6.13 Su emme ve görünür porozite ölçüm sonuçları

	MgO	MgO-C			MA-spinel		
	SÖRK-M97	%5C	%10C	%15C	TA00	TA43	TA67
Su Emme, %	6.50	1.60	1.40	1.10	4.26	3.12	3.19
Gör.Porozite, %	17.4	4.20	3.85	3.38	12.49	9.66	9.78

6.2.2 Hacim ağırlığı tayini

Çalışmalarda hacim ağırlıkları, ilk olarak DIN 51065'e göre yapılmıştır. Buna göre, 105 °C'de etüvde kurutulmuş küp şeklindeki numuneler, tartılarak ağırlıkları kaydedilmiştir. Daha sonra hacmi, geometrik hesap yoluyla belirlenmiştir. Bu belirlemeler sonrasında Eşitlik 6.3'ten yararlanılarak kuru ham yoğunlukları tespit edilmiştir. Sonuçlar, Tablo 6.14'te sergilenmektedir.

$$\rho_K = M_K / V_K \quad (6.3)$$

M_K : kuru ağırlık (g.)

V_K : Numune hacmi (cm³)

Yöntemlerden diğeri, Bölüm 4.2.1'de anlatılan porozite tespiti deneyinde olduğu gibi suda kaynatılan numunelerin suda doymuş ağırlıkları (M_D) ve askı ağırlıkları (M_A) ölçülmüş, daha sonra Eşitlik 6.4 yardımıyla numunelerin hacim ağırlıkları belirlenmiştir. Tablo 6.14'te sonuçlar görülmektedir.

$$\rho_K = (M_K) / (M_D - M_K) * (\rho_{su}) \quad (6.4)$$

M_K : Kuru ağırlık (kg.)

M_D : Doymuş ağırlık (kg.)

M_A : Askı ağırlığı (kg.)

ρ_{su} : Suyun yoğunluğu (10³ kg/m³)

Tablo 6.14 Kuru ham yoğunluk ve hacim ağırlığı ölçüm sonuçları (g/cm³)

	MgO	MgO-C			MA-spinel		
	SÖRK-M97	%5C	%10C	%15C	TA00	TA43	TA67
Kuru ham yoğ.	2.87	2.95	2.99	3.07	2.87	3.12	3.01
Hacim ağırlığı	2.90	2.95	3.00	3.07	2.89	3.13	3.03

6.2.3 Soğukta basma mukavemeti (SBM) tayini

Refrakter bir tuğlanın soğukta basma mukavemeti (SBM), Bölüm 4.2.2’de anlatıldığı gibi, DIN 51067’ye uygun olarak oda sıcaklığında belirlenmektedir. Refrakterlik açısından SBM, refrakterlerin mekanik etkilere karşı dayanıklılığını belirlediği için önemlidir. Deneyde maksimum 20t. basma gücüne sahip pres kullanılmıştır. Numunenin kırılmaya başladığı (mukavemet düşüşünün gözlemlendiği) yük kaydedilmiş ve Eşitlik 6.5 yardımıyla yapılan basit bir hesaplama ile SBM’ler hesaplanmıştır. Deneyde kullanılan refrakter numunelere ait SBM değerleri Tablo 6.15’te sergilenmektedir.

$$\sigma_{SBM} = P_{max.} / S_y \quad (6.5)$$

$P_{max.}$ = Kırılma anındaki yük (kg.)

S_y = Numunenin yük uygulana yüzeyinin alanı (m²)

Tablo 6.15 Refrakterlerin soğukta basma mukavemetleri (10⁴.kg/m²)

	MgO	MgO-C			MA-spinel		
	SÖRK-M97	%5C	%10C	%15C	TA00	TA43	TA67
SBM, 10⁴kg/m²	480.50	433.16	538.99	583.64	445.89	610.51	586.81

6.2.4 Sıcakta sabit yük altında refrakterlik (SYR)

Sabit yükleme altında ve artan sıcaklık karşısında refrakterin yumuşama sıcaklığının ve meydana gelen deformasyonun belirlendiği Yük Altında Refrakterlik testi, daha önce Bölüm 4.1.2’de de bahsedildiği gibi, DIN 51053 sayfa 1’deki esaslara göre gerçekleştirilmiştir. Bunun için numuneler özel olarak, 50 mm. çapında ve 50 mm. yüksekliğinde silindirik olarak hazırlanmıştır. MgO ve MgO-C numuneler, karot çıkartan testerelerle kesilerek, silindirik hale getirilmiştir. MA-spinel numuneler ise dökümle aynı boyutlarda ve silindirik olacak şekilde kalıplara dökülmek suretiyle hazırlanmıştır. Tüm numunelerin düzgün yüzeylerinde 12.5 mm. çapında delikler açılmıştır.

Daha sonra numuneler, Netzsch-421 E/6/6 Model test cihazına yerleştirilmiştir. 2 kp/cm² sabit yük altında ve 5 °C/dakika sabit ısıtma hızı ile 1600°C sıcaklığa kadar

çıkılmıştır. Bu sırada sürekli olarak, silindirin yüksekliğindeki değişimler, 10x büyütülerek yazıcılara kaydedilmiştir. Bu yükseklik değişiminde hem yük altındaki termal genleşmeler, hem de test cihazının genleşmesi paralel olarak gelişmektedir.

Elastik davranışın bitip, plastik şekil değiştirmenin başladığı nokta belirlenmiştir. Bunun için iç ve dış sıcaklık ölçerlerin kaydettiği piklerden çizilecek eğrinin sıcaklık eksenindeki sıcaklık değerleri tespit edilmiştir.

Bu testin sonucunda elde edilen sıcaklık-genleşme diyagramı, artan sıcaklık karşısında ve belirli bir yük altında malzemenin mukavemet performansını tüm açıklıkla sergilemektedir. Bunun için, genleşmenin kaydedildiği pikler değerlendirilmiş ve deformasyon eksenine ait değerler tespit edilmiştir. Piklerin çizdirildiği ölçülü özel kağıt üzerinde, deformasyon pikinin her bir sıcaklıkla kesiştiği nokta, cetvelle milimetrik olarak ölçülmüş ve kaydedilmiştir. Bu değerler, deformasyon miktarını belirten noktanın sıfır çizgisinden olan uzaklığını ifade etmektedir (L-değerleri). Bunlar daha sonra Eşitlik 6.6'da ayrıca değerlendirilmiş ve deformasyon eksen değeri olan, %-deformasyon miktarları hesaplanmıştır.

$$\% \text{-deformasyon} = (L \cdot 0.776) / h \quad (6.6)$$

L : Grafikten ölçülen deformasyon değerleri (mm.)

h : Numunenin yüksekliği (mm.)

0.776 : sabit (birim dönüşümleri ve diğer ayarlamalar için)

Son olarak hesaplanan bu %-deformasyonlar, gerçeğe uygun olarak normalize edilmek üzere her bir sıcaklığın deformasyon-sıcaklık referans çizgisini kestiği noktadaki deformasyon değeri ile -deformasyon pikinin karakterine göre toplanarak/çıkarılarak milimetrik kağıt üzerine nokta olarak kaydedilmiştir. Tüm sıcaklıklar için aynı şey tekrarlanmış ve sonunda noktalar birleştirilerek grafik meydana getirilmiştir.

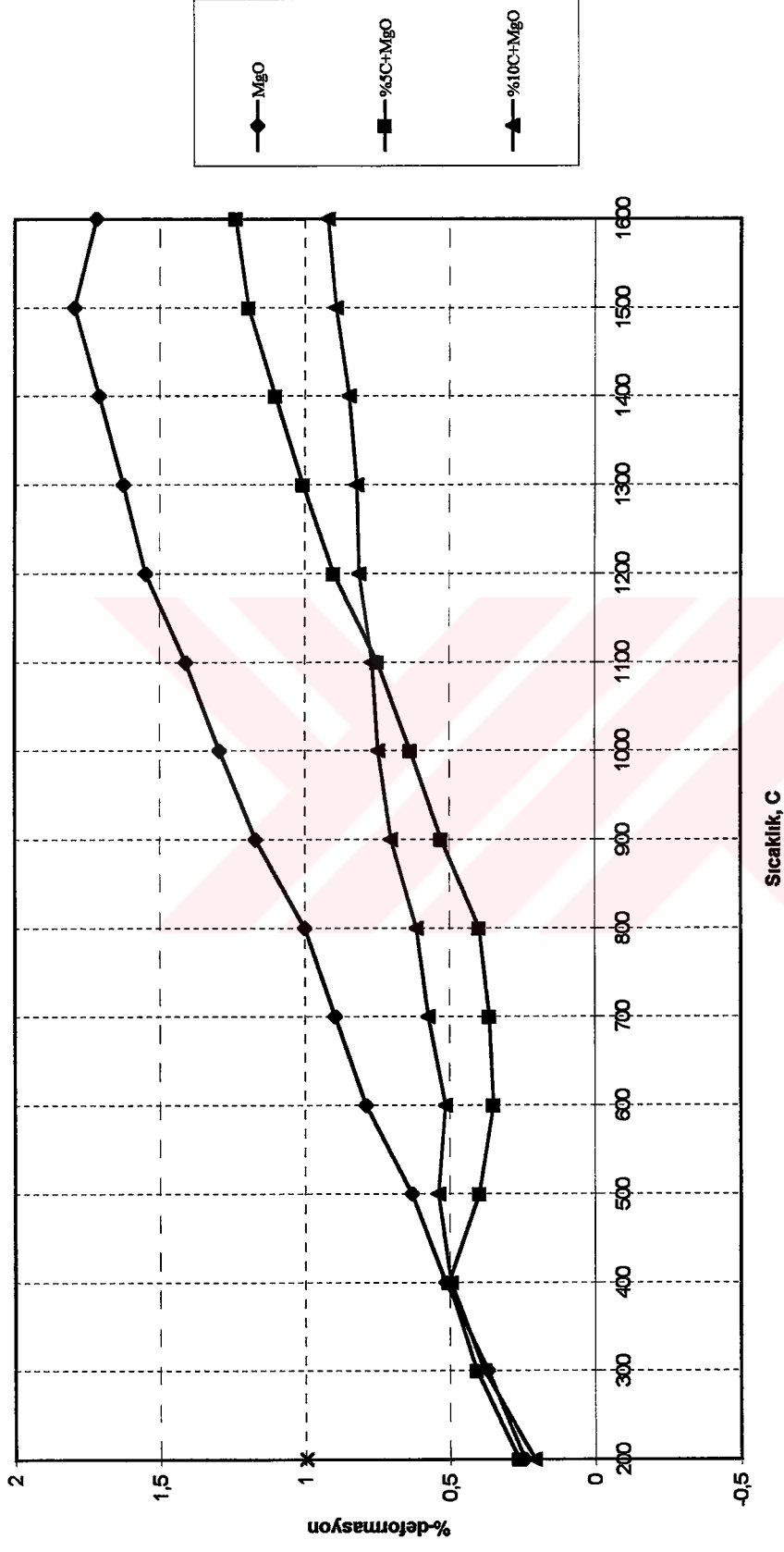
Tablo 6.16 ve Şekil 6.2-6.3'te tüm sonuçlar verilmiştir. Bu sonuçlardan da görüldüğü gibi, MgO refrakter, MgO-C refrakterlere göre soğukta olduğu gibi, yüksek sıcaklıkta da daha düşük mukavemet özelliği göstermiştir.

MgO-C refrakterlerin kendi aralarındaki kıyaslamasında ise karşımıza çıkan tabloya göre, ~600°C'ye kadar %10 C içeren MgO refrakterde karbonun yanması nedeniyle mukavemetin olumsuz yönde etkilendiği, bu nedenle %5 C içeren MgO'nin daha iyi bir performans sergilediği ortaya çıkmaktadır, fakat sonraki sıcaklıklarda durumun tersine döndüğü ve ~1100°C'den sonra %10 C'lu MgO refrakter numunesinin sıcakta refrakterlik özelliklerinin kararlı bir şekilde daha iyi olduğu gözlenmiştir. 1600°C'de; %10 C'lu MgO refrakterin maksimum deformasyonu % 0.92 ile diğer magnezit ve magnezit-karbon refrakter numunelerinden daha mukavemetli olduğunu göstermiştir.

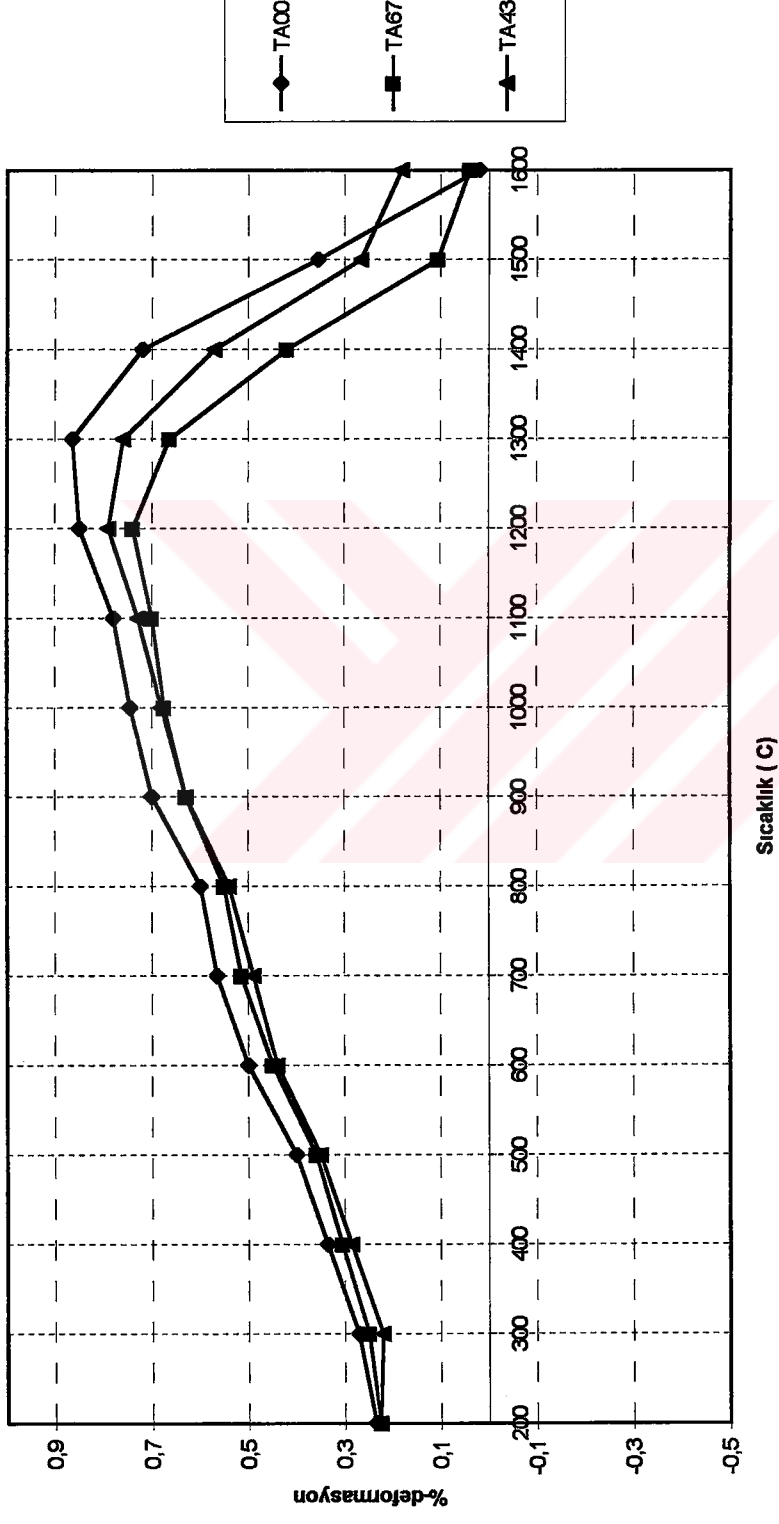
Tablo 6.16 Sıcakta 2 kp/cm² yük altında refrakterlik deneyi sonuçları

Sıcaklık, °C ↓	% -deformasyon					
	MgO	%5C-MgO	%10C-MgO	TA00	TA43	TA67
200	0,245	0,265	0,209	0.235	0.225	0.225
300	0,37	0,41	0,382	0.27	0.22	0.25
400	0,515	0,505	0,496	0.335	0.285	0.305
500	0,63	0,4	0,54	0.40	0.35	0.36
600	0,79	0,35	0,515	0.50	0.44	0.45
700	0,895	0,365	0,575	0.565	0.49	0.515
800	1	0,4	0,615	0.6	0.54	0.55
900	1,17	0,53	0,703	0.7	0.63	0.63
1000	1,295	0,635	0,747	0.745	0.68	0.675
1100	1,41	0,75	0,768	0.78	0.73	0.70
1200	1,548	0,9	0,812	0.85	0.79	0.74
1300	1,625	1,005	0,82	0.865	0.76	0.665
1400	1,71	1,1	0,847	0.72	0.57	0.42
1500	1,795	1,195	0,891	0.355	0.265	0.105
1600	1,72	1,24	0,92	0.02	0.18	0.04

MA-spinel refrakter numunelerine ait sonuçlar Şekil 6.3'te verilmiştir. Buna göre; MA-spinel numunelerinin hiçbirinde, termal genleşme sonucu deformasyon miktarının maksimum %0.9'u aşmadığı gözlenmiştir. Bu sonuç, MA-spinelin diğer magnezit ve magnezit-karbon refrakterlere göre artan sıcaklık karşısında daha az termal genleşmeye uğradığını, Bölüm 5.1.3'teki SE-analizinde hesaplandığı gibi, deneysel olarak da göstermiş olmaktadır. MgO ve MgO-C numuneleri, termal genleşme sonucu deformasyona 1600°C'nin üzerindeki sıcaklıklarda da artarak devam ettiği, buna karşın MA-spinelin 1650-1700°C'lerde, bağlayıcı fazının yumuşamasıyla birlikte çökme sonucu deformasyona uğramaya başladığı tespit edilmiştir. TA43, en iyi performansı sergileyen spinel refrakter numunesi olmuştur.



Şekil 6.2 MgO ve MgO-C refrakterlerin yük altında refrakterlik deneyi sonuçları

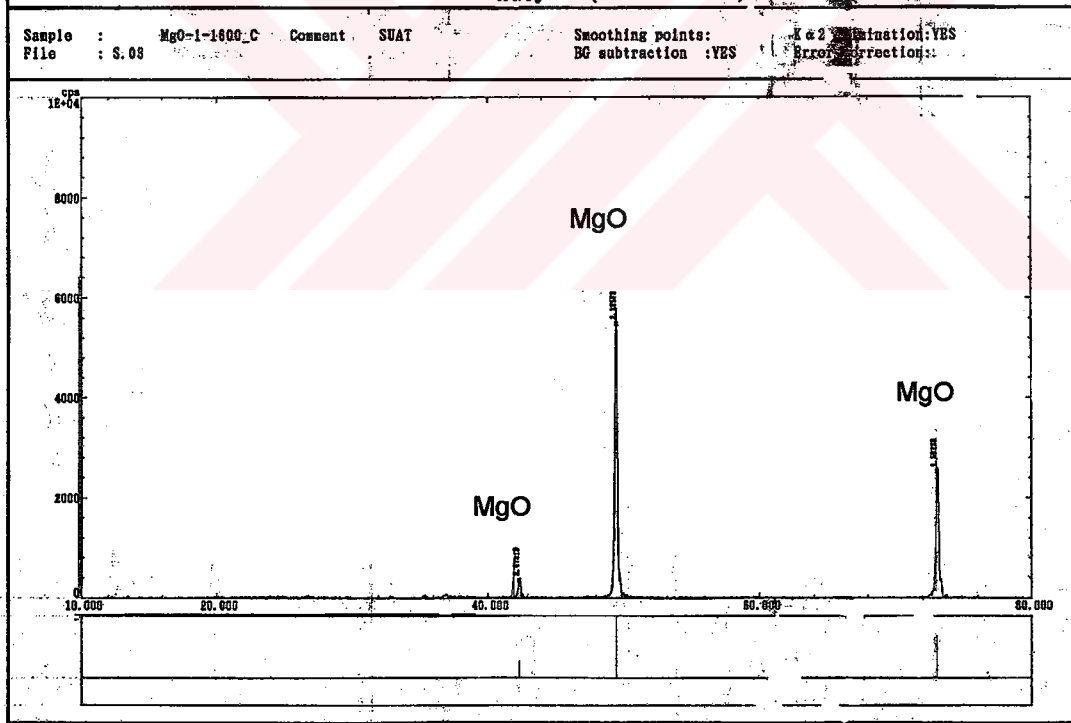


Şekil 6.3 MA-spinel refrakterlerin yük altında refrakterlik deneyi sonuçları

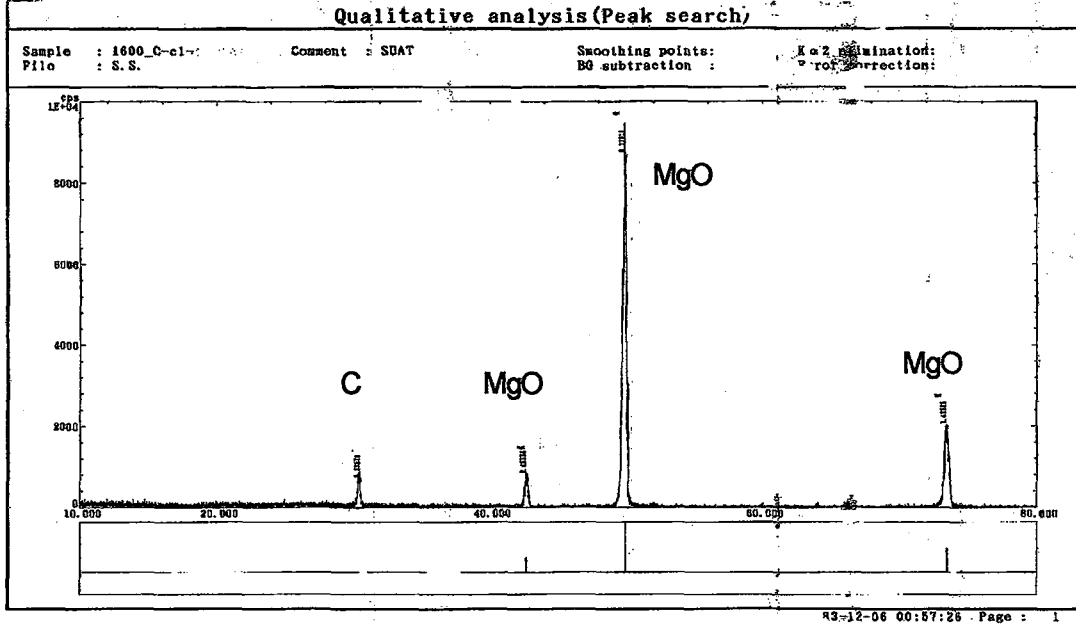
6.3 Refrakterlerin Faz Yapıları

Refrakter numunelerinin faz yapısının incelenebilmesi için, 1600°C'de 16 saat pişirilme sonrası refrakter örneklerine x-ışınları analizi uygulanmıştır.

Rigaku marka x-ışınları faz analizi cihazında yapılan analizlerden elde edilen x-ışınları piklerine göre; MgO refrakterlerde, beklendiği gibi sadece periklas (MgO) fazına (Şekil 6.4) rastlanırken, MgO-C refrakterlerde periklas fazının yanı sıra karbon (grafit) fazı tespit edilmiştir. Bu sonuç, karbonun yüksek sıcaklıkta yanmadan korunabildiğini göstermesi bakımından önem taşımaktadır. Karbonun yanmasının önlenmesi için; MgO-C refrakter numuneleri, özel hazırlanmış yüksek alüminalı refrakter kutu içinde yoğun grafit tozuna gömülerek pişirilmiştir. Böylece indirgen atmosfer sağlanmış ve karbonun yanması engellenmiştir (Şekil 6.5).

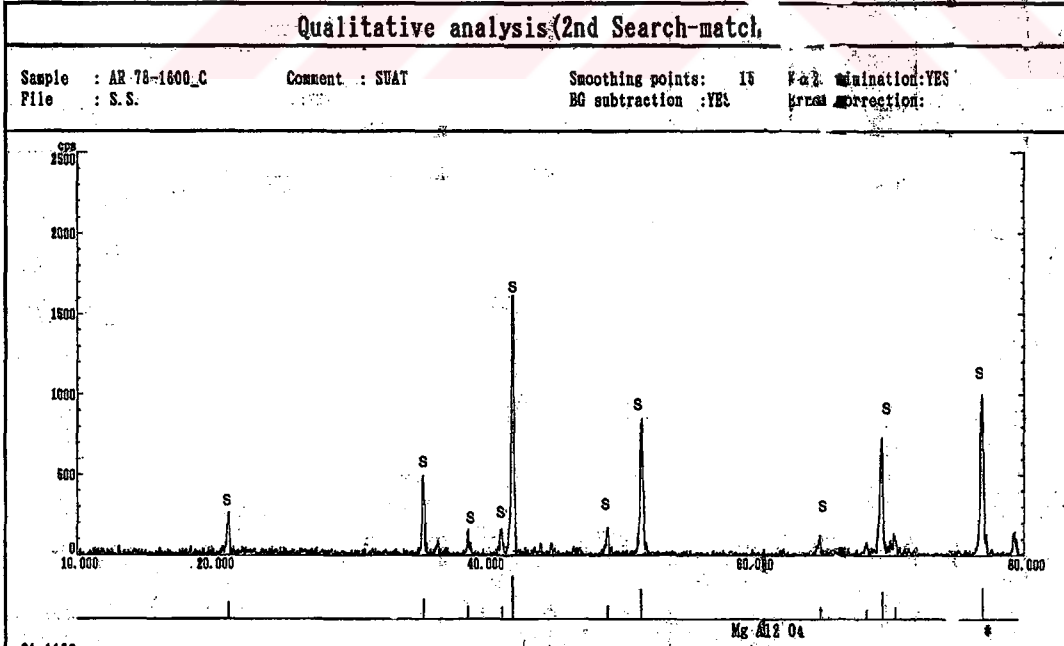


Şekil 6.4 MgO refrakterin x-ışınları faz analizi (1600°C'de 16 saat pişirme sonrası)



Şekil 6.5 %15C (grafit) katkılı MgO refrakterin x-ışınları faz analizi (1600°C'de 16 saat pişme sonrası)

MA-spinel refrakter numunelerinde, spinel fazın pişme sonrası özelliklerinin bozunmadan korunması ve ayrıca serbest MgO fazı içermemesi ya da çok az içermesi gerekmektedir. Yapılan x-ışınları faz analizi sonucu yapıda spinel fazın olduğu görülmüştür (Şekil 6.6).

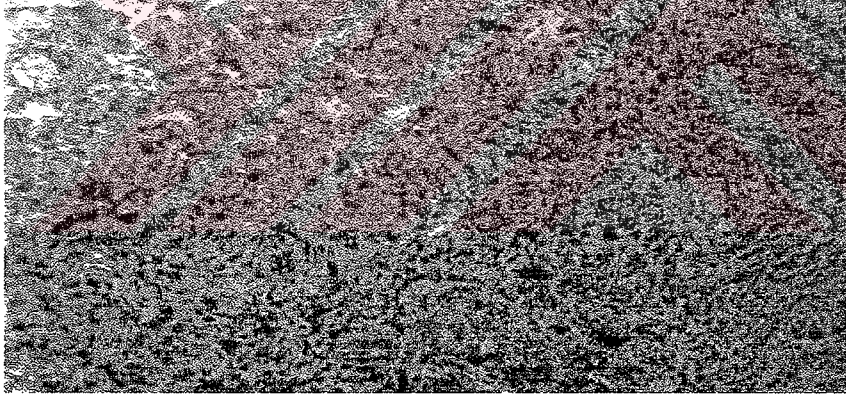


Şekil 6.6 MA-spinel refrakterin (TA00) x-ışınları faz analizi (1600°C'de 16 saat pişme sonrası, S:MA-spinel)

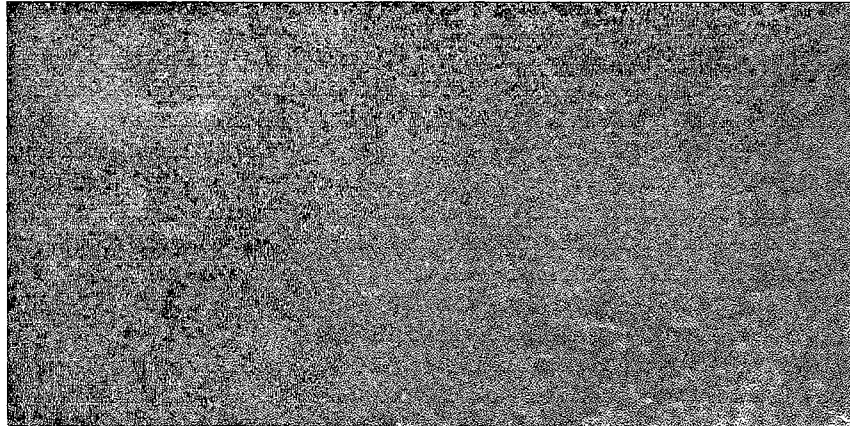
6.4 Mikroyapı İncelemeleri

Çalışmalarda kullanılan refrakter numunelerinin mikro yapılarının gözlenebilmesi, faz dağılımlarının, tane sınırlarının tespiti ve görüntülenmesi, kırık yüzeylerinin incelenmesi ve cürufle etkileşim bölgelerinin tesbit edilmesi için optik ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) altında incelemeler gerçekleştirilmiştir.

Optik mikroskop altında gözlem yapabilmek için, refrakter numuneler bir dizi metalografik işlemlerden geçirilmiştir. Bunun için önce numuneler, bakalitle kaplanmış ve daha sonra kabadan inceye doğru sırasıyla 80-150-320-400-600-800-1000 numara zımparalar ile zımparalanarak, yüzey temizce parlatılmıştır. Parlatılan numuneler, hazır duruma getirildikten sonra, mikro yapının ve özellikle cüruf yayılım alanının incelenebilmesi için optik mikroskop altında incelenmeye alınmıştır. Şekil 6.1'de %15 grafit katkılı MgO refrakterin, Şekil 6.7'de, MgO refrakterin ve Şekil 6.8'de ise MA-spinel refrakterin optik mikroskop altında gözükten mikro yapı görüntüleri verilmiştir.

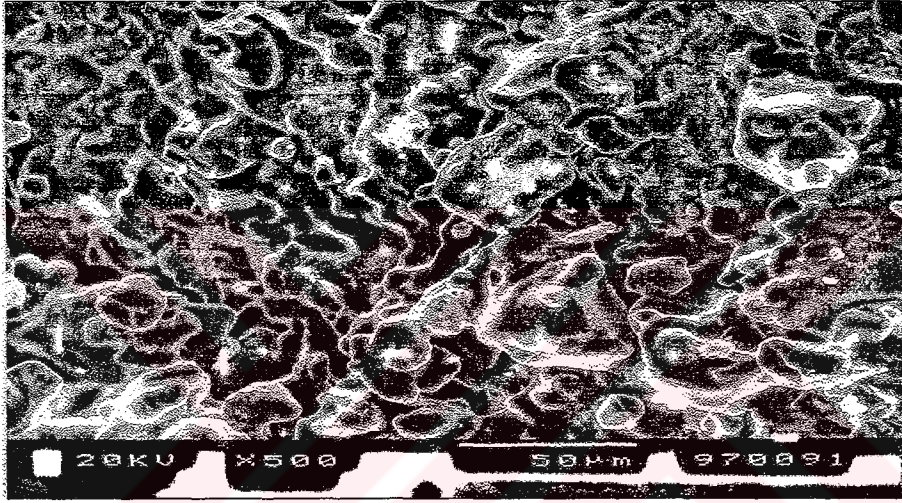


Şekil 6.7 MgO refrakterin optik mikroskop altındaki mikroyapı görüntüsü (x200)

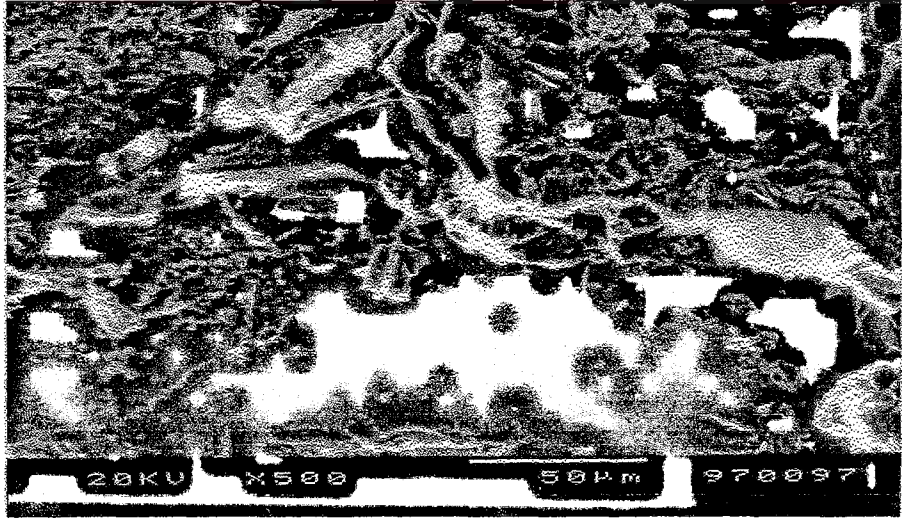


Şekil 6.8 MA-spinelin optik mikroskop altındaki mikroyapı görüntüsü (x200)

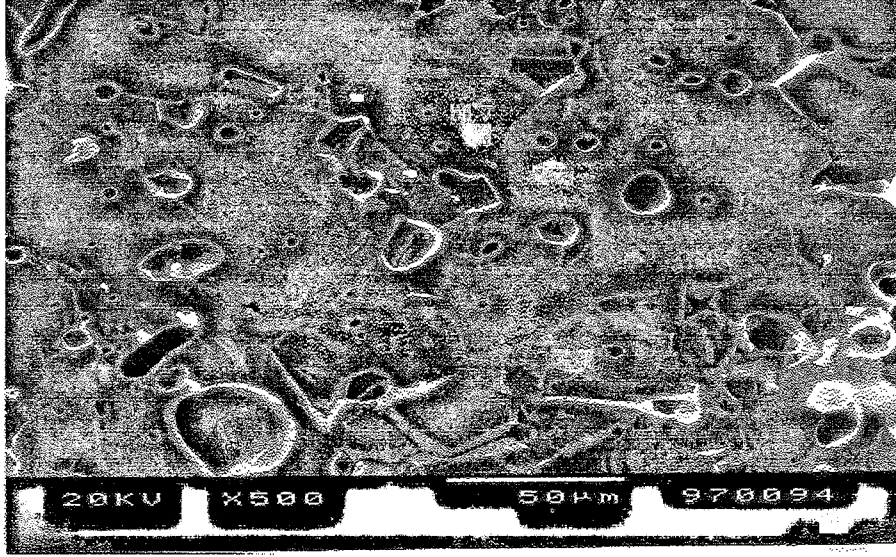
Refrakterlerin kırılma özelliklerinin belirlenebilmesi için kırık yüzeyleri, SEM’de incelenmiştir. Bunun için önce numunelerin kırık yüzeyleri vakum altında karbonla kaplanmıştır. Yapılan incelemeler sonucu, Şekil 6.9-6.11’de görülen kırık yüzey görüntülerine göre, MgO, MgO-C ve MA-spinel refrakterlerin hepsi intergranüler yani tane sınırlarından kırılma özelliği gösterdiği görülmüştür. Bu sonuç, refrakterlerin termal şoka karşı özelliklerinin iyi olduğu anlamını taşımaktadır. Şekil 6.11’deki MA-spinel yapı içinde maksimum $\sim 25\mu\text{m}$ ’e kadar kapalı gözeneklerin bulunduğu da tespit edilmiştir.



Şekil 6.9 MgO refrakter tuğlanın kırık yüzeyinin SEM’deki görüntüsü



Şekil 6.10 MgO-C (%15 C katkılı) refrakter tuğlanın kırık yüzeyinin SEM’deki görüntüsü



Şekil 6.11 MA-spinel (TA00) dökme refrakterin kırık yüzeyinin SEM'deki görüntüsü

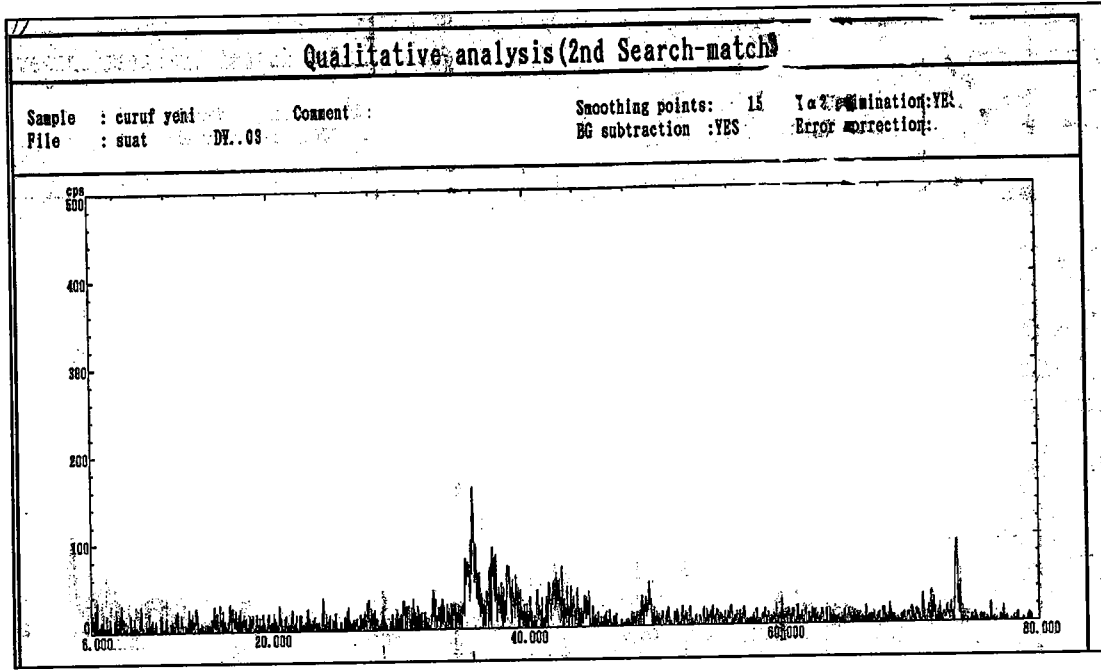
6.5 Refrakter Malzemelerin Cürufra Etkileşiminin Pota Yöntemi ile Belirlenmesi ve İncelenmesi

6.5.1 Çalışmada kullanılan endüstriyel cürufun özellikleri

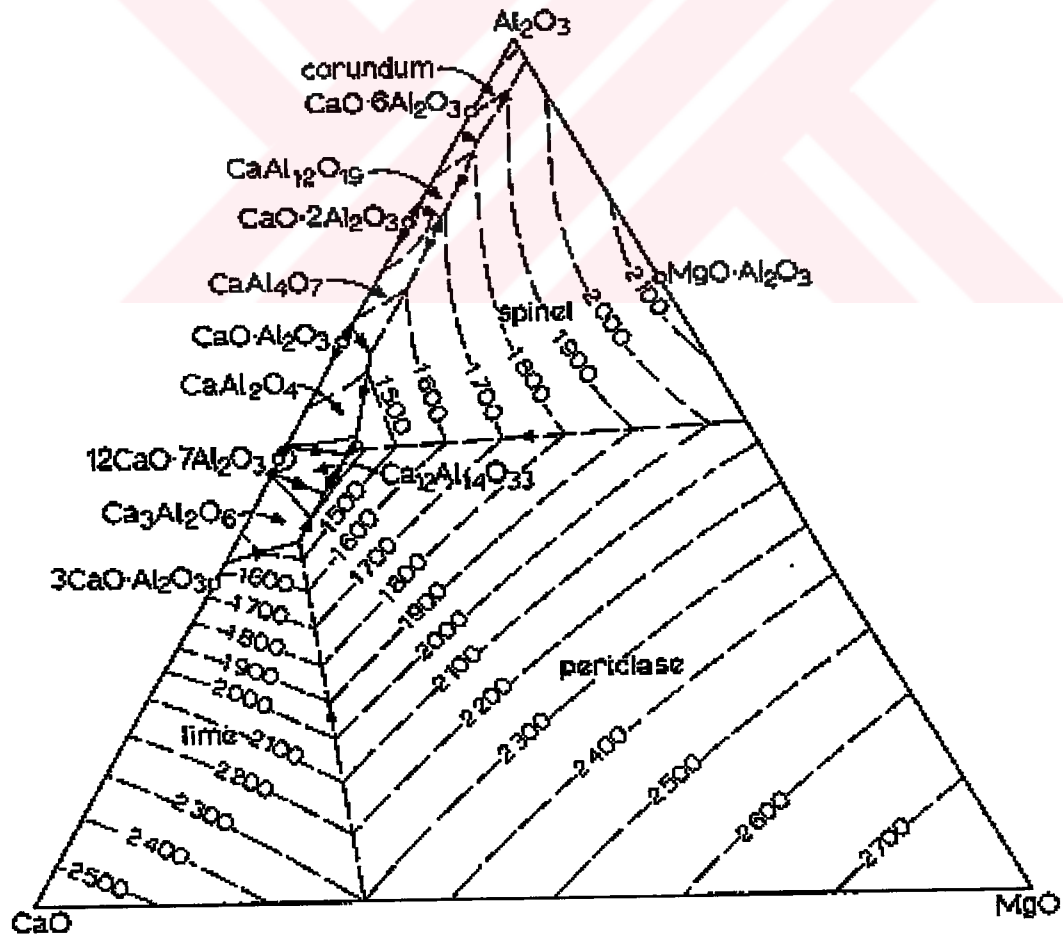
Çalışmada kullanılan çelik pota cürufu, ERDEMİR A.Ş.'de konverterden potaya sıvı çelik dökümü yapıldıktan hemen sonra sıvı metal alım kepçeleriyle potanın yüzeyinden alınmış ve havada soğutularak katılaştırılmıştır. Bu cüruf numunesine yapılan kimyasal analiz sonuçları, Tablo 6.17'de verilmiştir. Buna göre; cüruf içinde CaO , Al_2O_3 ve daha düşük miktarda olmak üzere MgO kimyasal bileşiklerinin cürufun temel bileşimini oluşturduğu tespit edilmiştir. Aynı cürufta; yapılan x-ışınları faz analizi sonucu ise, Şekil 6.12'de görülmektedir. Şekilde yoğun olarak görülen birbirine yakın piklerin verdiği sonuçlara göre, cüruf içinde başlıca kalsiyum-alüminat (CaAl_2O_4 ve CaAl_4O_7) ve az miktarda kalsiyum-silikat fazlarının bulunduğu tespit edilmiştir. Şekil 6.13'teki $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-MgO}$ üçlü denge diyagramında kalsiyum-alüminat fazlarının yeri, $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-CaO}$ kenarı üzerinde ve komşu fazlar olarak görülmektedir.

Tablo 6.17 Endüstriyel çelik pota cürufu numunesinin kimyasal bileşimi (%)

SiO_2	MnO	Al_2O_3	CaO	MgO	P_2O_5	K_2O	TiO_2	Na_2O	S	Fe_2O_3
7.60	4.01	30.80	39.05	12.03	0.09	0.01	0.19	0.02	0.06	7.90



Şekil 6.12 Çelik pota cürufu numunesinin x-ışınları faz analizi



Şekil 6.13 CaO-MgO-Al₂O₃ üçlü faz denge diyagramı [51, s 184]

Bölüm 4.4'te açıklanan nedenlerle refrakterlerin cürufa karşı dayanımlarının belirlenmesi için DIN 51069'a göre yapılacak olan Pota Yöntemi deneyi için cüruf numunesi öğütülmüş ve daha sonra 100 μ elekten elenerek, elek altı kullanılmak üzere ayrılmıştır. Etüvde 100°C'de kurutulan cüruf tozu, refrakter potalara şarj edilmek üzere tartılmıştır. Bu tartımda, silindirik pota deliğinin geometrik hacmi ve bu hacmi en uygun doldurabilecek toz miktarı belirlenmeye çalışılmıştır.

6.5.2 Refrakter potaların hazırlanması, deneyin yapılışı ve ilk gözlemler

Pota Yöntemi'ne göre refrakter numune hazırlanırken; refrakter tuğladan kesilen (ya da dökülebilir refrakterler için uygun döküm kalıpları hazırlanmıştır) 50x50x50 mm. boyutlarında küp şeklindeki numunelerin yüzeylerinden birinde matkap ile delmek suretiyle 25mm. çap ve 25 mm. derinlikte çukur oluşturularak potalar meydana getirilmiştir. Böylece hazırlanmış MgO-C ve MA-spinel refrakter potalar, 100 °C'ye ayarlı etüvde bekletilerek kurutulmuş ve önceden tartımı yapılarak hazırlanmış toz cüruf, potalara şarj edilmiştir. Pişirme işleminde Naber marka HT 16/17 model, molibden disilid ısıtıcı elemanlara sahip zaman kontrollü fırın kullanılmıştır. 1500 ve 1600 °C olmak üzere iki ayrı grup pişirme sıcaklığında yapılan deneylerde, 10 °C/dakika fırın ısıtma hızı uygulanmış ve her sıcaklıkta 16 saat beklendikten sonra soğutulmuştur.

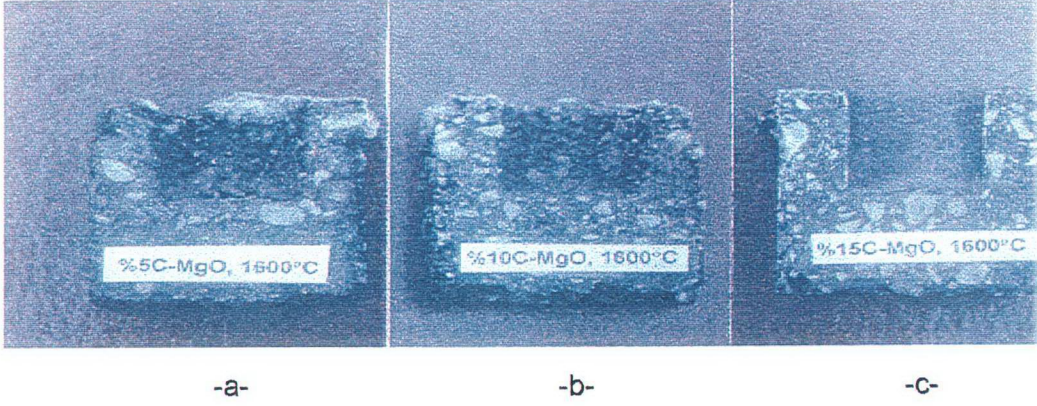
MgO-C potaların pişirimi sırasında, içerdiği karbon fazının yanmasını önleyebilmek amacıyla indirgen atmosfer sağlanmıştır. Bunun için pişirme işlemi, özel olarak hazırlanmış yüksek alüminalı refrakter kutular içinde toz grafitte gömülerek gerçekleştirilmiştir.

6.5.3 Cüruf-refrakter etkileşiminin çeşitli yönlerden incelenmesi

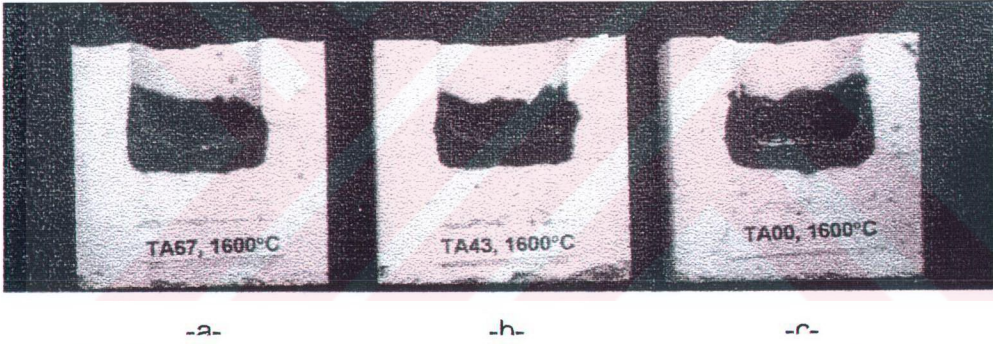
6.5.3.1 Gözle yapılan inceleme

Ergitme işleminden sonra, potalar elmas kesici testere ile ortadan aksel olarak kesilerek, reaksiyon yüzeyleri ortaya çıkarılmıştır. Daha sonra da cüruf-refrakter etkileşiminin ilk etapta gözle incelemeler yapılmıştır. Pota numunelerinin fotoğrafları, Şekil 6.14-6.15'te gösterilmiştir. Şekil 6.14 a,b,c' de verilen MgO-C refrakterlerin reaksiyon yüzeylerine bakıldığında; karbon oranı arttıkça cürufa kaşı mukavemetin yükseldiği rahatça görülmektedir. En fazla grafit (C) oranı içeren

%15C-MgO numunesi, sıvı cüruf ile temastan en az etkilenen MgO-C refrakter numunesi olmuştur.



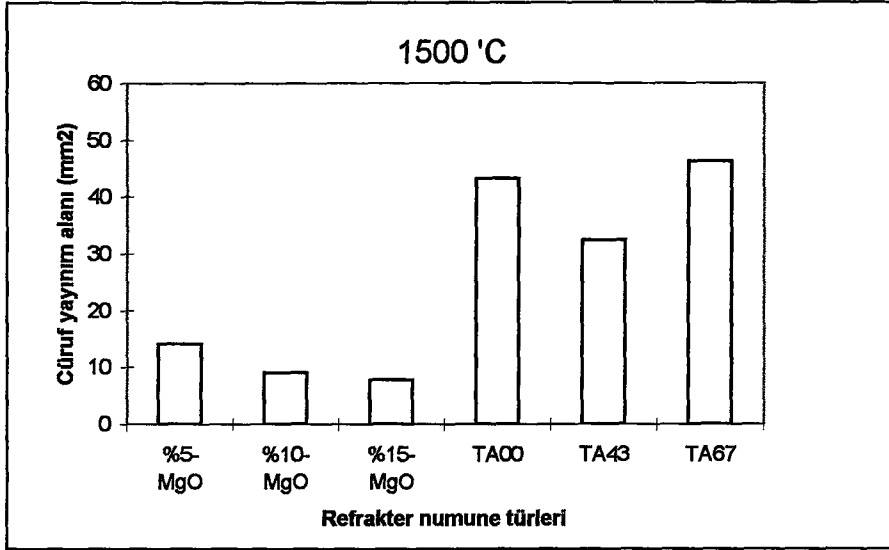
Şekil 6.14 MgO-C tuğla refrakterlerin cürufle etkileşim bölgeleri (a-%5 C'lu, b-%10 C'lu, c-%15 C'lu)



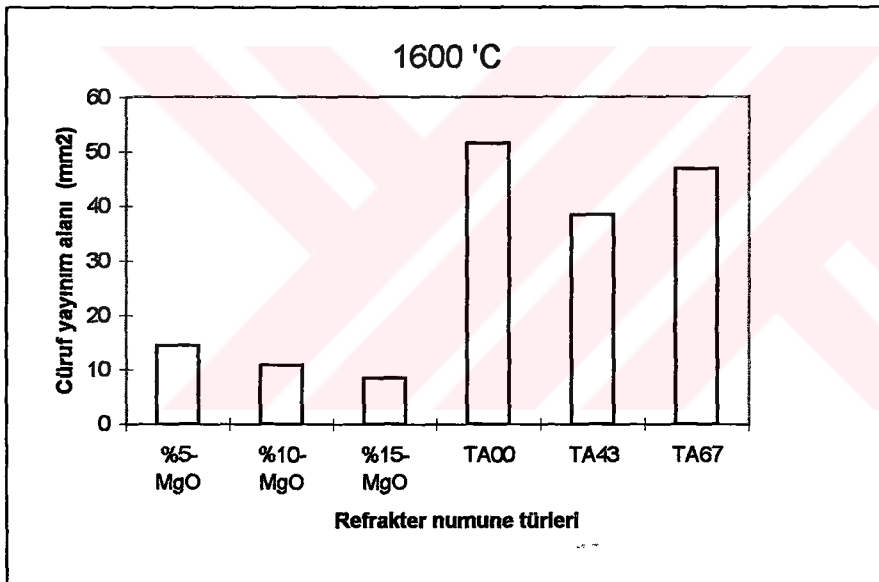
Şekil 6.15 MA-spinel dökme refrakterlerin cürufle etkileşim bölgeleri (a-%67 tabular alüminalı , b-%43 tabular alüminalı, c-tab. alümina içermiyor)

6.5.3.2 Cürufun refrakter içinde yayınma alanlarının tespiti

Eksenel olarak kesilen yüzeyler üzerinde cürufun refrakter üzerine yayınma alanı tespit edilmiş ve milimetrik kağıt yardımıyla tüm refrakter pota numuneleri için bu yayınma bölgelerinin alanı hesaplanarak, kaydedilmiştir.



Şekil 6.16 1500°C'de meydana gelen cüruf-refrakter korozyonunun farklı numuneler için karşılaştırması



Şekil 6.17 1600°C'de meydana gelen cüruf-refrakter korozyonunun farklı numuneler için karşılaştırması

Şekil 6.16 ve 6.17'de 1500 ve 1600°C sıcaklıklarda refrakterlerde meydana gelen cüruf yaynım alanları, karşılaştırılmalı olarak gösterilmiştir. Beklendiği üzere, artan sıcaklığın, refrakterler üzerindeki cüruf etkisini artırdığı gözlenmiştir. MgO-C refrakterlerin cürufa karşı direnci MA-spinel refrakterlere kıyasla daha yüksek olmuştur. Ayrıca karbon miktarının artışına bağlı olarak, bu direnç daha da yükselmiş ve %15 C katkılı pota numunesi, cüruf etkisine karşı en yüksek direnç gösteren refrakter örneği olmuştur. Böylece artan oranda karbon katkısının, Bölüm

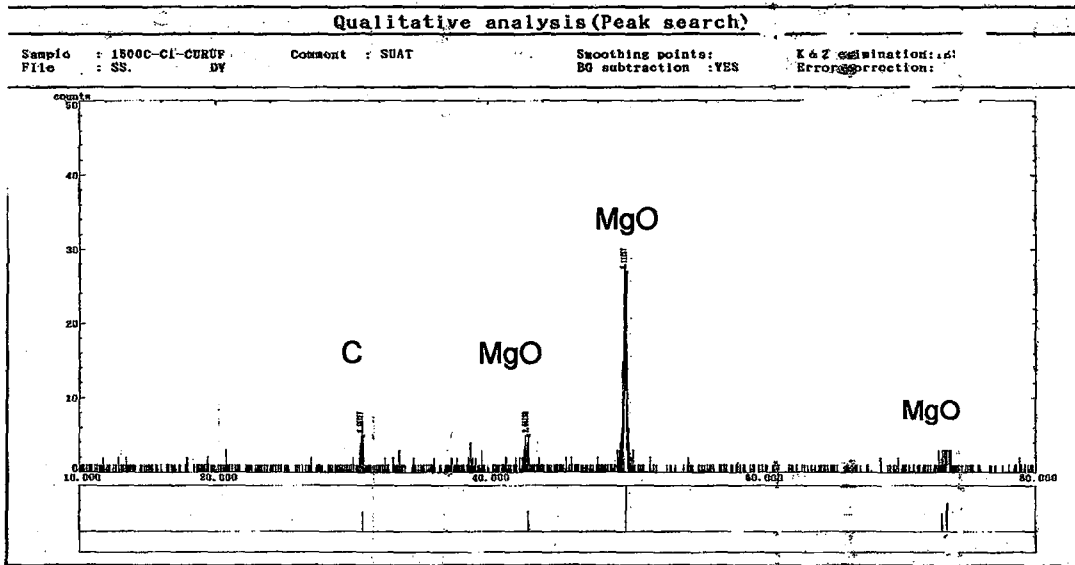
4.4'te açıklandığı gibi refrakter ıslanmazlık özelliği kazandırarak, cürufun, refrakter içerisinde yayınmasını engellediği gözlenmiştir.

Diğer taraftan, MA-spinel refrakter numunelerinin cüruf etkisine karşı dirençlerinin, MgO-C refrakterlere göre daha düşük olduğu gözlenmiştir. Kendi aralarında kıyaslandığında %43 tabular alümina içeren (TA43) spinel refrakter örneğinin cürufa karşı direnci, diğer spinel örneklerine göre daha iyi olduğu tespit edilmiştir. Bunun nedeni; Tablo 6.13'te görüldüğü gibi, TA43 numunesinin içerdiği porozite miktarının, diğer spinel numunelere göre daha düşük olmasıdır.

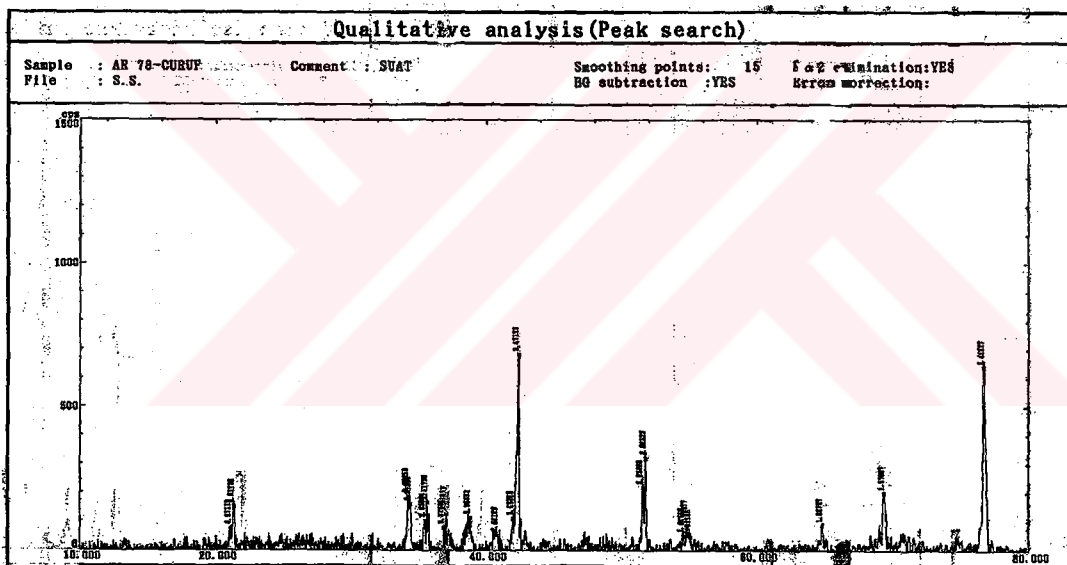
6.5.3.3 Cüruf-refrakter etkileşiminde meydana gelen fazların incelenmesi

Cüruf-refrakter etkileşimi sonrasında meydana gelebilecek yeni fazların daha iyi değerlendirilebilmesi için, cüruf-refrakter arasındaki ilişkiyi faz denge sistemleri altında incelemek yararlı olacaktır. Çalışmada kullanılan çelik pota cürufu kimyasal analizi içinde diğer oksitlere göre en yüksek oranlar, CaO, Al_2O_3 ve MgO olması ve refrakter malzemeleri oluşturan en önemli fazlar, periklas (MgO) ve MgO- Al_2O_3 -spinel olması nedeni ile Şekil 6.13'deki CaO- Al_2O_3 -MgO üçlü denge diyagramı yardımıyla bu inceleme gerçekleştirilmiştir.

Cürufila etkileşmiş bölgelerden alınan örneklerle yapılan x-ışınları analizine göre; MgO-C numunelerin cürufila etkileşim bölgelerinde periklas (MgO) (6.18), fazına yoğun olarak rastlanırken, refrakterin cüruf içinde çözünmediği görülmüştür. MA-spinel refrakterin cürufila etkileşiminde ise, MA-spinelin yanı sıra şekil 6.19'da da görülen C_3A ($3CaO.Al_2O_3$) ve $C_{12}A_7$ ($12CaO.7Al_2O_3$) fazlarının varlığı tespit edilmiştir. Analiz sonuçlarına göre; MA-spinel refrakterin, meydana gelen etkileşim nedeniyle, cüruf içinde kimyasal çözünmeye uğradığı anlaşılmıştır.

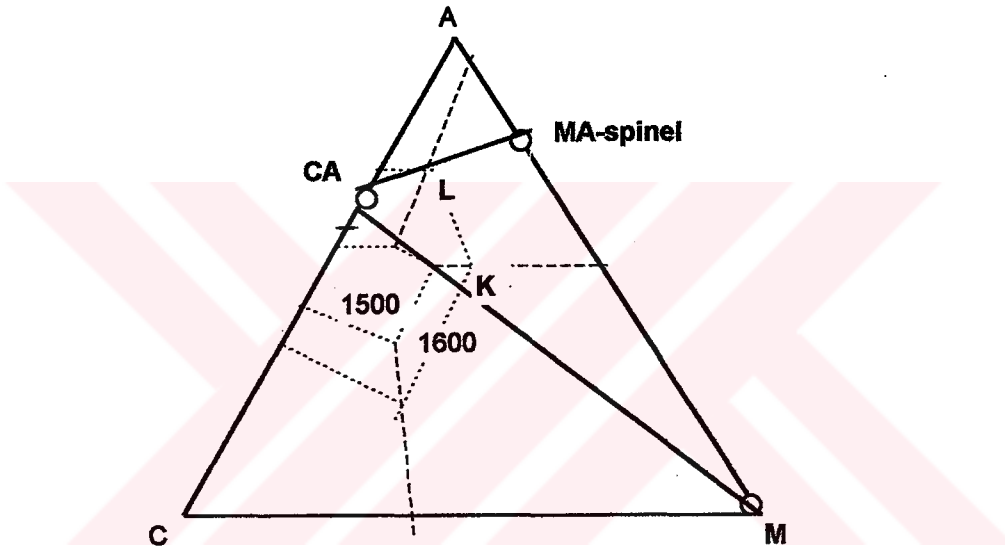


Şekil 6.18 MgO-C refrakterin 1600 °C'de 16 saat cüruflla etkileşmiş bölgesinden alınan örneğin x-ışınları faz analizi



6.5.3.4 Cürufun refrakter içinde çözünürlüğünün incelenmesi

Faz denge diyagramları yardımıyla dengedeki iki fazın herhangi bir sıcaklıkta birbiri içinde %-çözünme miktarı, Şekil 6.20'deki örnekte gösterildiği gibi ve 'CA-K', 'K-M', 'CA-L', 'L-MA' doğrularının milimetrik ölçekle ölçülüp, birbirine oranlanmasıyla tespit edilebilmektedir [45]. Kaldıraç Kanunu olarak da bilinen bu yöntemle göre Şekil 6.13'teki $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-MgO}$ üçlü denge diyagramından yararlanılarak, cürufta hakim faz olarak bulunan $\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3$ (CA) içinde MgO (M) ve MA-spinel fazlarının (MA) çözünme miktarları belirlenmiştir.



Şekil 6.20 MgO ve MA-spinel refrakterlerin cüruf içindeki çözünürlüğünün Kaldıraç Kanunu ile belirlenmesinin şematik gösterimi

Şekil 6.20'de ifade edilmeye çalışıldığı gibi, Şekil 6.13'teki $\text{CaO-MgO-Al}_2\text{O}_3$ üçlü denge diyagramı içinde; CA ($\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3$) cüruf fazının bulunduğu nokta, MgO refrakterler için M köşesi ile MA-spinel refrakterler içinse MA-spinel fazının bulunduğu nokta arasında bir doğru yardımıyla bağlantılandırılmıştır. Eş sıcaklık eksenlerinden 1600°C'yi işaret eden eksenle, bu doğrunun kesiştiği noktalar, K ve L olarak işaretlenmiştir. Daha sonra MgO fazının cüruf içindeki çözünme miktarını belirlemek amacıyla '[CA]-K' ve 'K-[MgO]' arası milimetrik olarak ölçülmüş ve değerler aşağıda verilen eşitlik içinde kullanılarak hesaplanmıştır. Aynı yöntemle,

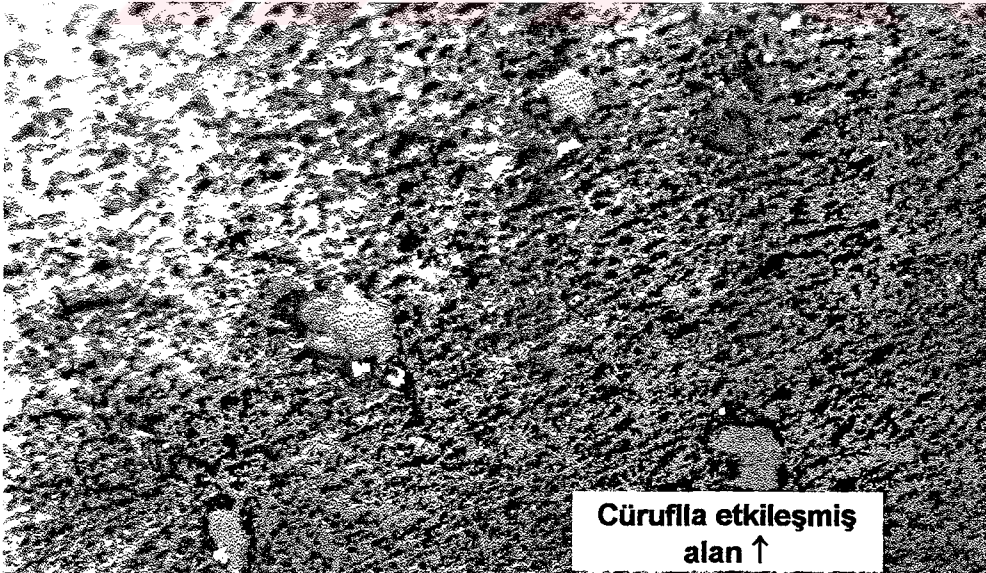
fakat bu defa MA-spinel fazının, CA içinde çözünme miktarı da hesaplanmıştır. Bunun için eşitlik içinde $|CA-L| / |L-MA|$ oranısı kullanılmıştır.

$$\% \text{-çözünme miktarı} = |CA-K| / |K-M| \times 100$$

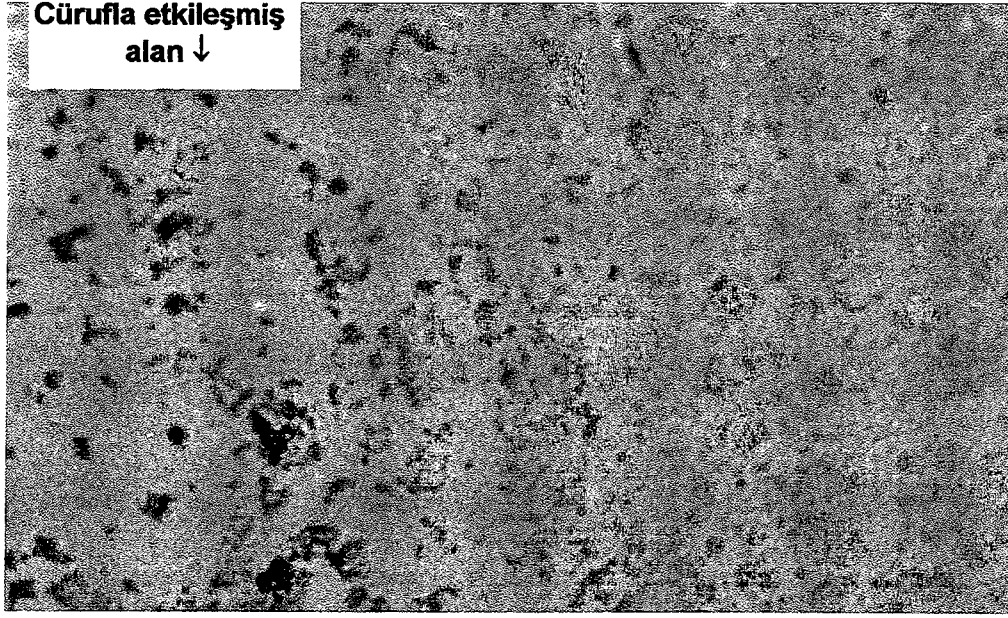
yapılan bu hesaplamalar ile, cüruf içinde MgO refrakterin çözünürlük miktarı %10.1 MA-spinelin çözünürlük miktarı %27.8 olarak hesaplanmıştır.

MgO refrakterin 1600°C'de cüruf içindeki çözünürlük miktarı, MA-spinel refraktere göre oldukça düşük çıkmıştır. MgO-C refrakterlerde ise, Şekil 6.16 ve 6.17'de de görüldüğü gibi, cürufun refrakter içinde çok az yayındığı görülmüştür. Karbon katkılı MgO refrakterde; karbonun cüruf etkileşimine karşı refraktere çok iyi bir korunak sağladığı belirlenmiştir. Çünkü pul şekilli grafit (karbon) yaprakları, eşeksenli MgO kristallerinin arasına girerek kristalleri sarmalamakta ve kristaller arası boşluğu doldurarak, ıslanmazlık özelliği sağlamaktadır.

Cüruf-refrakterler etkileşimine ilişkin, optik mikroskopta yapılan incelemeler sonucunda elde edilen görüntüler, Şekil 6.21-6.22'de verilmiştir. Görüntüler içindeki daha koyu bölgeler, cürufun refrakter içinde yayındığı bölgeler olarak tespit edilmiştir.



Şekil 6.21 %15C-MgO pota numunesinin cüruf ile etkileşim bölgesinden çekilen optik mikroskop görüntüsü (x200)



Şekil 6.22 MA-spinel (TA00) pota numunesinin cüruf ile etkileşim bölgesinden çekilen optik mikroskop görüntüsü (x200)

7 SONUÇLARIN İRDELENMESİ ve ÖNERİLER

7.1 Sonlu Elemanlar Analizleri Sonuçlarının İrdelenmesi

7.1.1 Termal özelliklerin irdelenmesi

Çalışma konusu olan sıvı çelik potası için, MgO-C/MgO aşınma astarlı refrakter dizaynı ile MgO-Al₂O₃-spinel aşınma astarlı dizaynların sıcaklıkla ilgili analizlerinin Şekil 5.20'deki toplu sonuçlarına bakıldığında; MA-spinelli astarın daha dik sıcaklık gradyanına sahip olduğu görülmektedir. Başka bir ifadeyle; bu astar içinde sıcaklık, daha kısa süre ve kalınlıkta azalmakta, yani daha hızlı soğumaktadır. Özellikle cüruf bölgesi için bu durumun önemli bir anlamı bulunmaktadır. Çünkü sıvı cürufun, refrakter üzerine korozyon etkisini arttıran önemli etkenlerden birisi, cürufun temasta olduğu refrakterin sıcaklık gradyanının düşük olması ile birlikte ergime sıcaklığının üzerinde kalarak, eriyik halini sürdürmesi ve böylece katılaşıcağı sıcaklığa düşünceye kadar refrakter aşınma astarı içinde yayınmasını devam ettirebilmesidir. Bu açıklamaya göre, MA-spinelli aşınma astarının -astar sıcaklık gradyanının cüruf-refrakter korozyonuna etkisi açısından bakıldığında-, MgO-C/MgO astara kıyasla daha iyi olduğu sonucu çıkarılmaktadır.

Potanın en dış katmanı olan çelik mantonun çalışma sıcaklığının düşük seviyelere çekilmesi, önemli konulardan bir diğeridir. MA-spinelli astarın sıcaklık gradyanının MgO aşınma astarlı (sıvı çelik çalışma bölgesi) ve MgO-C aşınma astarlı (cüruf bölgesi) dizayna göre daha dik olması, MA-spinelli astarın başka bir avantajı olarak görülmektedir. Çünkü yapılan hesaplamalar, MA-spinelli dizayn içinde emniyet astarına ulaşıldığında sıcaklığın; cüruf bölgesi için ~550°C ve çalışma bölgesi için ~1010°C olduğunu göstermiştir. Oysa diğer astar dizaynı içinde MgO-C refrakterli cüruf bölgesi emniyet astarı, ~860°C ve MgO refrakterli çalışma bölgesi emniyet astarı, ~1230°C ile daha yavaş bir soğuma hızı göstermiştir. Bu sonuçlara göre; aşınma astarı MA-spinel malzemeye örülen bir pota astar sisteminde çelik manto

sıcaklığı, daha düşük seviyelere çekilebilecektir. Böylece ısı kayıplarının önüne geçilerek enerji tasarrufu sağlanabilecektir.

7.1.2 Mekanik ve termo-mekanik özelliklerin irdelenmesi

Mekanik ve termo-mekanik özelliklerin belirlenmesine yönelik yapılan SE-analizlerinin Şekil 5.27-5.38'deki sonuçlarından açıkça görülebileceği gibi, termal genleşme sonucu meydana gelen yer değiştirmeler, hidrostatik basınç nedeniyle meydana gelen yer değiştirmelerden oldukça fazladır ve dikkate alınması bakımından çok daha önem taşımaktadır.

Hidrostatik basınç sonucu en yüksek mekanik gerilmeler, beklendiği gibi astar duvarının alt kısmına doğru yoğunlaşmaktadır. Ancak, bu bölgelerde termal genleşmeler sonucu oluşan gerilmeler, yine de daha çok etkilidir.

Cüruf bölgesinin üst kısmında, termal genleşmeler sonucu oluşan yer değiştirmelerin maksimum olduğu gözlenmektedir. ERDEMİR A.Ş. Çelikhane'sinde yapılan incelemelerde; potanın bu bölgesinde meydana gelen elastik şekil değiştirmenin olumsuz etkilerinden korunmak için, pota ağız kısmında, refrakterle çelik manto arasında genleşme payı bırakılarak, bu boşluğun kolay şekil değiştirebilen dökme refrakter harcı ile doldurulmakta olduğu gözlenmiştir. Çalışma sırasında çoğu kez bu harcın şiddetli gerilmeler sonucu parçalandığı görülmüş, bu durumda temizlenerek, yeni harç ile örümü sağlanmıştır [47]. Tablo 7.1'de bu iki sonucun, tüm modeller için genel bir kıyaslaması özetlenmiştir.

Tablo 7.1 Pota astarı üzerindeki termo-mekanik gerilme ve yer değiştirmelerin yoğunlaştığı bölgeler, şiddetleri ve yönleri

	1) Hidrostatik Basınç Gerilmesi		2) Isıl Gerilmeler	
Bölgeler↓/GerilimYönü→	x-yönü	y-yönü	x-yönü	y-yönü
Cüruf Bölgesi	o	↓	→→→→	↑↑↑↑
Çalışma Bölgesi	→	o	→→→→	o
Taban	o	↓	o	↑↑

(o : çok az, → : az, →→ : orta, →→→ : çok, →→→→ : çok yüksek).

Potalarda refrakter astarın örümü sırasında, kritik olan bölgelerin tespit edilmesi ve alınacak tedbirlere (genleşme payı bırakma v.b. gibi) ışık tutması bakımından, SEY ile hesaplamalar önemli bir öngörü olanağı sağlamıştır.

Maksimum termal gerilmelere bağlı genleşmenin (şekil değiştirmenin), refrakter çeşidine göre değişimine bakıldığında, MA-spinel refrakter kullanılan aşınma astarının daha az genleşmeye uğradığı görülmüştür. Standart astar modeli içinde maks. yer değiştirme miktarı, 0.0295 m.'dir. Aynı astarın MgO-C/MgO dizaynında maks. yer değiştirme miktarı, 0.0548 m.'dir ve MA-spinelli modelin yaklaşık iki katı kadardır. Böylece yüksek sıcaklıklarda MA-spinel refrakterlerin mekanik mukavemetinin daha yüksek olduğu gözlenmektedir. Düşük genleşme özelliği ile MA-spinelli astarda çatlak meydana gelme riski daha az olacağından, bu durum, MA-spinel refraktere avantaj sağlamaktadır. Aynı sonuç, Bölüm 6.2.4'te anlatılmış olan deneysel çalışmayla da gözlenmiştir.

7.2 Deneysel Çalışma Sonuçlarının İrdelenmesi

7.2.1 Mekanik ve termomekanik özelliklerin irdelenmesi

Deneysel çalışmada kullanılan refrakter malzemeler içinde; Tablo 6.13'te de görüldüğü gibi, MgO-C tuğla refrakterler ile MA-spinel dökme refrakterlerin, görünür porozitelerinin, MgO tuğla refraktere göre daha düşük olduğu görülmüştür. Buna paralel olarak da Tablo 6.14 ve 6.15'te görüldüğü gibi, hacim ağırlıkları ve soğukta basma mukavemetlerinin (SBM) daha yüksek olduğu görülmüştür.

MgO-C refrakterlerin kendi aralarındaki kıyaslamasında, grafit miktarı arttıkça porozitenin azaldığı ve SBM'nin yükseldiği görülmektedir. Esnek pul şeklindeki grafit, eşeksensli periklas (MgO) taneleri arasındaki boşlukları doldurarak porozitenin azalmasına ve dolayısıyla mukavemetin artmasını sağlamaktadır. Örnek olarak; %15C-MgO tuğla numunesinin görünür porozite miktarı (%3.38) ile MgO tuğla numunesinin görünür porozite miktarı (%17.4) karşılaştırıldığında, bu fark kolayca anlaşılmaktadır.

MA-spinel dökme refrakterleri içinde; %9.66'lık görünür porozite miktarı ile en az poroziteli ve 610.51 kg/cm² ile SBM'i en yüksek numune, %43 tabular alümina içeren TA43 numunesi olduğu görülmüştür. Bunu Tablo 6.13 ve 6.15'te de

görüldüğü gibi, %67 tab. alümina içeren TA67 ve stokiometrik spinel bileşimine sahip olan TA00 izlemektedir. TA43 ve TA67 bileşimlerinin sonuçlarının birbirine yakın olduğundan hareketle tabular alüminanın spinel yapısını güçlendirici etkisi olduğu sonucuna varılmaktadır.

MgO-C tuğla (%15C-MgO) ile MA-spinel dökme (TA43) refrakterleri arasında SBM'i yönünden yapılan kıyaslama sonucu, MA-spinel dökme refrakterin (610.51 kg/cm^2), MgO-C tuğla refraktere (583.64 kg/cm^2) göre birbirine yakın SBM özelliği sergilediği görülmüştür. Görünür porozitesi daha yüksek olmasına rağmen gözlenen bu farkın, üretimde kullanılan hammaddelerin daha saf olmasına ve özellikle alüminanın yüksek mukavemetine bağlı olduğu düşünülmektedir.

Refrakterlerin yüksek sıcaklıkta sabit basınç altında mukavemet (SYR) deneyi sonuçları, Şekil 6.2-6.3'te verilmiştir. Buradan görülebildiği gibi, MgO refrakterin SYR'i diğerlerine göre daha düşüktür.

MgO-C refrakterlerde; %5C-MgO'in, 1100°C 'ye kadar %10C-MgO'ya göre basınca karşı direncinin daha yüksek olduğu gözlenmiş, bunun karbon fazının yanmasından kaynaklandığı anlaşılmıştır. 1100°C 'den sonra %10C-MgO'in sıcakta mukavemetinin daha yüksek olduğu ve kararlılık kazandığı tespit edilmiştir.

MgO ve MgO-C numuneleri içinde termal gerilmeler nedeniyle en az deforme olan %10C-MgO numunesi, ~%0.92 oranında termal genleşme gösterirken, MA-spinel refrakter numuneleri, ~%0.89'luk maksimum deformasyonla, termal gerilmeler karşısında daha az genleşmeye uğramıştır. Bölüm 5.4'te açıklanan termomekanik SE-analizleri sonuçlarına göre de, 1500°C 'ye kadar olan sıcaklıklarda MA-spinelli pota refrakter astarının termal genleşme miktarı, MgO-C/MgO'li astara göre daha düşük olduğu hesaplanmış ve böylece iki sonuç arasında tutarlılık olduğu görülmüştür.

7.2.2 Cüruf-refrakter etkileşim sonuçlarının irdelenmesi

Cüruf refrakter etkileşimini belirlemek için uygulanan Pota Yöntemi'nin sonuçları, Şekil 6.14-6.15 ve Şekil 6.16-6.17'de görülmektedir. Buna göre, MgO-C numunelerinin pota cürufuna dayanıklılığı, MA-spinel numunelerine kıyasla yüksek olduğu görülmüştür.

MgO-C numuneleri kendi aralarında karşılaştırıldıkları zaman, C miktarı arttıkça cüruf dayanımının yükseldiği gözlenmiş ve %15C-MgO numunesinin cürufa en dayanıklı refrakter olduğu tespit edilmiştir.

MA-spinel numuneleri arasında %43 tabular alümina içeren TA43 numunesi, porozitesinin düşüklüğü nedeniyle, diğer spinel numuneleri içinde cürufa karşı en yüksek direnci gösteren MA-spinel refrakter numunesi olmuştur.

Bölüm 5.2'deki SE-analizleri sonuçlarına bakıldığında, MA-spinelli astarın ısıl gradyanının, MgO-C'lu astara kıyasla daha dik olduğu görülmektedir. Bu özellik, sıvı cürufun, temasta olduğu refrakterin çabuk soğuması ile birlikte hızlı katılaşması nedeniyle; refrakter içinde daha fazla yayınımları sürdürememesine ve böylelikle korozyonun yavaşlamasına etki etmektedir. MA-spinelin bu olumlu özelliğine karşın, cüruf bölgesi için malzeme seçiminde en önemli kriter olan cüruf korozyonuna direnç bakımından MgO-C refrakterlere kıyasla daha zayıf performans gösterdiği görülmüştür. MgO-C refrakterlerin cürufa karşı yüksek direncinin sebepleri aşağıda izah edilmeye çalışılmaktadır:

- Grafit (karbon) pul şekilli yapısıyla MgO tanelerini sararak, refrakter boyunca bir bütünlük ve süreklilik kazanması sonucu, Bölüm 4.4 ve Bölüm 6.5.3.3'te açıklandığı gibi refraktere, ıslanmazlık özelliği kazandırılmaktadır. Böylece sıvı cüruf, refrakter yüzeyinden içeriye yayılma fırsatı bulamaktadır.
- Şekil 6.18'de %15C-MgO refrakter numunesinin cüruf ile etkileşmiş bölgesinden alınan örneğe uygulanan x-ışınları faz analizi sonucunda, yeni bir faz yapısına rastlanmamıştır. Bu, cüruf-refrakter arasında herhangi bir kimyasal reaksiyonun gerçekleşmediğini göstermektedir. Bu durum, CaO-Al₂O₃-MgO üçlü denge diyagramında da görüldüğü gibi, cüruf içinde MgO'nin çözünme miktarının çok düşük olduğundan ileri gelmektedir. Bölüm 6.5.3.3'te açıklandığı gibi, deneylerde kullanılan cüruf numunesinin içinde MgO'nin çözünme miktarı, ~%10'dur. MA-spinel'in cüruf içinde çözünürlüğü ise ~% 27 ile yaklaşık üç kat daha fazladır.

- MA-spinel refrakterler, MgO-C refrakterlere göre daha gözenekli yapıya sahiptir. Şekil 6.19'da cüruf ile MA-spinel refrakter numunesinin etkileşim bölgesinden alınan örneğin x-ışınları faz analizi sonuçlarına göre, kimyasal bazı reaksiyonlar sonucu oluşan kalsiyum-alüminat (C_3A ve $C_{12}A_7$) fazlarının varlığını göstermektedir. Oluşan bu kalsiyum-alüminat fazları, cürufun viskozitesini azaltarak, refrakter içindeki gözeneklere sızmayı ve yayınmayı kolaylaştırmakta, bunun sonucunda ise MA-spinel refrakter üzerine korozyonu güçlendirmektedir.

Bu nedenlerin tümü biraraya geldiğinde, MgO-C refrakter malzemelerinin pota cürufuna karşı dayanımlarının, MA-spinel malzemelere göre daha yüksek olduğu sonucuna varılmaktadır. Birbirleri ile karşılaştırıldığında, MgO-C refrakterler arasında %15C-MgO refrakter numunesinin, içerdği C miktarının daha fazla olmasıyla birlikte refraktere daha iyi ıslanmazlık özelliği kazandırması sonucu, cürufa karşı en iyi dayanımı gösteren refrakter numunesi olduğu görülmektedir.

7.3 Genel Sonuç İrdelemesi

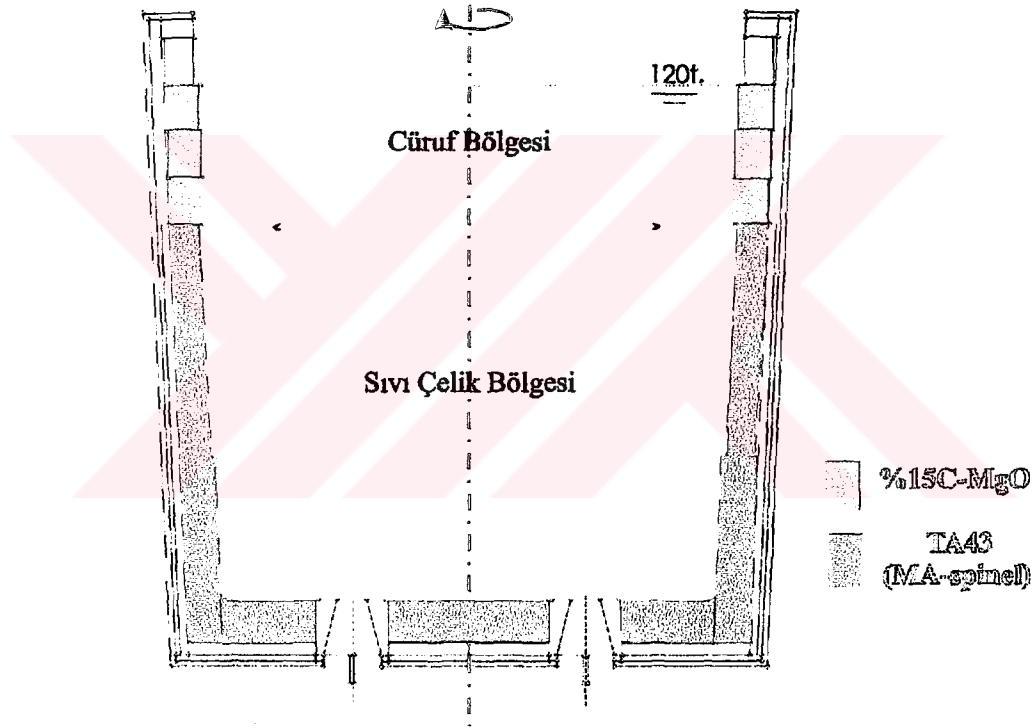
Sonlu Elemanlar Yöntemi'nden yararlanılarak pota refrakter astarı üzerinde gerçekleştirilen,

- Termal analizler yardımıyla; bir ve birden çok refrakter malzeme veya malzeme gruplarının astar içindeki sıcaklık dağılımları ve ısıl gradyanları belirlenerek, birbirleriyle karşılaştırmalı olarak incelenip, böylece en uygun astar sistemi oluşturulması çabalarına katkı sağlanmaktadır.
- Mekanik ve termomekanik analizler yardımıyla; astar ve astarı oluşturan refrakter malzeme boyutları optimize edilerek, çalışma şartlarında meydana gelen/gelebilecek gerilim/şekil değiştirme eğilimleri ve etkileri rahatlıkla tespit edilebilmekte ve böylece bir öngörüş olanağı kazanılmış olmaktadır.

Potalarda klasik bazik dizaynı içinde aşınma astarı olarak kullanılmakta olan MgO-C, MgO refrakter malzemeleri ile bunlara alternatif olarak geliştirilen MA-spinel refrakter malzemesinin genel olarak avantaj ve dezavantajlarına bakıldığında; MA-

spinel malzemesinin, gerek termal, gerekse mekanik ve termomekanik davranışlarının MgO-C ve MgO refrakter malzemelere kıyasla daha üstün olduğu, ancak kimyasal açıdan cürufa karşı direncinin MgO-C refrakter malzemesine göre düşük olduğu ortaya çıkmıştır.

Bu nedenlerle; Şekil 7.1'de de görüldüğü gibi, %43 tabular alümina içeren TA-43 MA-spinel dökülebilir refrakterlerin, potanın sıvı çelik bölgesi duvar ve taban aşınma astarında, %15C-MgO tuğla refrakterlerin ise potanın cüruf bölgesi aşınma astarında tercih edilmesi önerilmektedir.



Şekil 7.1 Pota aşınma astarının; cüruf bölgesinde, %15C-MgO tuğla ve sıvı çelik bölgesi duvar ile tabanında, TA43 dökülebilir refrakterleriyle dizaynının gösterimi

KAYNAKLAR

- [1] ZIENKIEWICZ, O.C. Methode der finiten Elemente, Carl Hanser Verlag, München, (1975)
- [2] BATHE, K.-J. Finite-Elemente-Methoden, Springer Verlag, Berlin (1986)
- [3] BEER, G. WATSON, J.D. Introduction to Finite and Boundary Element Methods for Engineers, John Wiley&Sons., New York, (1992)
- [4] MULLER, G. Finite Elemente: Einführung in das Arbeiten mit ANSYS an nacvoll-ziehbaren Beispielen, Dr. Alfred Hüthig Verlag, Heidelberg, (1984)
- [5] KIENOW, S. Rißbildung in gebrannten Konvertersteinen, Ber. DKG 47, pp.426-430, Juli (1970)
- [6] BUTTER, J., DE BOER, J. Stress calculations for refractory materials with help of the finite element method, Refractories R&D Hoogeveens Groep, Netherland, (1990)
- [7] BELL, D.A., PALIN, F.T. Computer modelling of mechanical behaviour of refractories in iron and steelmaking applications, Unitecr'89, Am.Ceram.Soc. Meeting, Indianapolis, 23-27 April (1989)
- [8] CHEN, E., BÜYÜKÖZTÜRK, O. Methodology for thermomechanical analysis of brittle systems, Ceramic Bulletin, Vol.64, pp.982-988, No.7 (1985)
- [9] TSENG, T., BÜYÜKÖZTÜRK, O. Thermomechanical behavior of refractory concrete linings, J. Amer. Ceram. Soc., Vol. 65, pp.301-307, No.6 (1982)
- [10] KNAUDER, J., RATHNER, R. Problembloesung bei konverterzustellungen auf Basis thermomechanischer Analysen, Radex-Rundschau, pp.203-212 (1990)
- [11] RATHNER, R., KNAUDER, J., SCHWEIGER, H.F. Konstruktive Aspekte und thermomechanisches Verhalten von Konverterauskleidungen, Radex-Rundschau, pp.317-327, Dezember (1990)
- [12] KNAUDER, J., RATHNER, R. Finite-Elemente-Studie über das thermo-mechanische Verhalten von magnesitischen Feuerfestprodukten am Beispiel eines Konverterbodens, Radex-Rundschau, pp.354-364, Dezember (1990)

- [13] CHEN, E. Simulation des thermomechanischen verhaltens einer monolithischen feuerfestauskleidung unter kohlevergasungsbedingungen, Radex-Rundschau, pp.376-384, Heft 4 (1990)
- [14] RÖDL, S. Betriebsorientierte prozeßsimulation für die pfannenmetallurgie, Stahl und Eisen 115, pp.97-100, Mai (1995)
- [15] KARHUT, G. ve diğ. Monolithische Pfannenzustellung bei VOEST-Alpine stahl Linz GmbH-Betriebserfahrungen und metallurgische Ergebnisse, Veitsch-Radex Rundschau, pp.494-511, Heft1-2 (1994)
- [16] FEMGEN/FEMVIEW, Manuel Book Rev. 2.3-9, :Femsys Ltd., Leicester, (1992)
- [17] MISES3, Programmbenutzerhandbuch Rev.10.3, TDV-Tech. Datenverarbeitung GmbH, Graz, (1995)
- [18] ANSYS, User's Manuel Book for Revision 5.0, Swanson Analysis Systems, Inc., Houston, (1992)
- [19] TIMOSHENKO, S., GOODIER, J.N. Elastisite Teorisi, çev. KAYAN, İ., ŞUHUBİ, E., İTÜ Kütüphanesi sayı:757, Arı Basımevi, İstanbul, (1969)
- [20] YILMAZ, S., SCHWEIGER, H.F. FEM-Untersuchung an der Feuerfestzustellung einer 120-t-Stahlgießpfanne, Stahl und Eisen 117, pp.71-74, Juni (1997)
- [21] YILMAZ, S., SCHWEIGER, H.F., ÖZGEN, S. Sonlu Elemanlar Yöntemi Yardımıyla Sıvı Çelik Döküm Pota Refrakter Astarının Termo-Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi, 9. Uluslararası Metalurji ve Malzeme Kongresi Bidiriler Kitabı, s.549-556, 11-15 haziran (1997)
- [22] LUTCHKE, H. Stationaere und instationaere Waermeübertragung, 40.Int. Feuerfest-Kolloquium, Stahl und Eisen Special, pp.45-51, September (1997)
- [23] BİRAN, L., YARIZ, E. Genel Matematik, İ.İ.T.İ.A. Yay. No. 361/594, İstanbul, ocak (1982)
- [24] ŞEŞEN, M.K. Demir-Çelik Üretim Teknolojileri, Gelişmeler ve Refrakter Kullanımı, Konya Krom-Magnezit A.Ş. Eğitim Seminerleri, Konya (1995)
- [25] SÖRMAŞ A.Ş. Çelikhane Refrakterleri Kataloğu, Söğüt Refrakter Malz. A.Ş., Söğüt, (1997)
- [26] MANNESMANN DEMAG, Innovations in Steelmaking Shops, Hüttentechnik, Germany, (1988)
- [27] RADEX, Çelik Endüstrisi ve Refrakterleri, Meslek içi eğitim seminer notları, 30.03-01.04.1989, İzmir

- [28] **DİKEÇ, F.** Demir Çelik Endüstrisinde Pota Metalurjisinin Yeri, Önemi ve Gelişimi, TMMOB-Metalurji Dergisi 58, s.9-13, (1991)
- [29] **ÖZGEN, S.** Metalurji Fırınları ve Refrakter Malzemeler, İTÜ Metalurji Müh. Böl., (yayına hazırlanıyor)
- [30] **SCHULLE, W.** Feuerfeste Werkstoffe, Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie GmbH, Leipzig, (1990)
- [31] **SALMANG, H., SCHOLZE, H.** Keramik, Springer Verlag, Vol.1, Berlin, (1982)
- [32] **OLBRICH, M., DOBROWSKY, F.** Periclase Spinel Bricks in the Cement Ind., Radex-Rundschau, pp.300-311, Heft 2-3 (1980)
- [33] **KRIECHBAUM, G.W., WOHRMEYER, C., ROUTSCHKA, G.** New Spinel Materials for Refractory Linings in the Steelmaking Sector, ALCOA Firması ürün tanıtım yayını, Bonn, (1995)
- [34] **RYSKEWITCH, F., RICHESON, D.** Oxide Ceramics, Academic Press, (1985)
- [35] **BARTHA, V.P.** Entwicklungstendenzen bei Spinell-haltigen feuerfesten Steinen..., Glastech. Ber. 58, pp.288-294, Nr.10 (1985)
- [36] **HART, L.D.** Alumina Chemicals: Science and Technology, Am.Ceram.Soc. Inc., (1990)
- [37] **HANCOCK, J.D.** Practical Refractories, (1988)
- [38] **BUGAJSKI, M., SCHWAIGER, R.** Freifließende Gießmassen-eine neue Generation ungeformter feuerfester Produkte, Veitsch-Radex Rundschau, pp.44-52, Heft 1 (1996)
- [39] **SALMANG, H., SCHOLZE, H.** Keramik, Springer Verlag, Vol.2, Berlin, (1983)
- [40] **DIDIER, F.** Feuerfeste Baustoffe und Ihre Eigenschaften, Didier Werke AG, Wiesbaden, (1974)
- [41] **CHESTERS, J.H.** Refractories: Production and Properties, The Iron and Steel Institute, London, (1973)
- [42] **KIENOW, S.** Die mechanische und chemische Beanspruchung feuerfester Baustoffe, Klepzig Fachber. 78, pp.28-33, Januar (1970)
- [43] **HOFFMANN, D.H.** Slag Attack on Refractories, Interceram, pp.484-486, 4 (1980)
- [44] **ÖZGEN, S.** Metalurji Fırınlarda Refrakter Korozyonu, I. Ulusal End. Fırınlr Konf. Bildiriler Kitabı, Y.T.Ü., 12-14 ekim (1992)
- [45] **FORD, W.F.** The Effect of Heat on Ceramics, MACLAREN and Sons Ltd., London, (1967)

- [46] AGST, J. Die feuerfesten Baustoffe, Duisburg, (1986)
- [47] ERDEMİR A.Ş. 120 t.'luk Sıvı Çelik Döküm Potası teknik çizimi ve bilgileri, Ereğli Demir-Çelik Fabrikaları T.A.Ş., Kdz. Ereğli, (1995)
- [48] YILMAZ, S., SCHWEIGER, H.F., ÖZGEN, S. FEM-Untersuchungen des thermo-mechanischen Verhaltens von MgO-C/MgO und MgO-Al₂O₃-Spinell im Verschleißfutter, einer 120 t Stahlgießpfanne, 40. Int. Feuerfest-Kolloquium, Stahl und Eisen Special, pp.31-34, September (1997)
- [49] VEITSCH-RADEX AG. Feuerfestproduktkatalog für die Stahlindustrie.
- [50] ÇİTOSAN A.Ş. Refrakterler Kataloğu, Türkiye Çimento ve Toprak Sanayii T.A.Ş., Konya (1993)
- [51] SCHACHT, A., C. Influence of lining restraint and non linear material properties in predicting thermal shock fracture of refractory linings, Unitecr'89, Am.Ceram.Soc. Meeting, Indianapolis, 23-27 April (1989)
- [52] ZEDNICEK, W. Periklas ein bemerkenswertes und wesentliches Mineral in der Feuerfest-Keramik, Radex-Rundschau, Heft 4 (1985)
- [53] GUENARD, C., VELLUET, P. Characterization of the properties of magnesia-carbon bricks, Radex-Rundschau, pp.391-406, Heft 2 (1984)
- [54] DE BOER, J., BEELEN, M. Characterization of the properties of magnesia-carbon bricks, Radex-Rundschau, pp.407-416, Heft 2 (1984)
- [55] POLESNIG, W., ZEDNICEK, W. Magnesia-Alumina-Steine als Auskleidungsmaterial in der Zementindustrie und ihr Verhalten gegenüber Zementklinker, ZKG, pp. 18-28, Januar (1984)
- [56] Mc CAULAY, R.A. Corrosion of Ceramics, Marcel Dekker Inc., NewYork, (1995)
- [57] ALA, F.Ş., ŞAHİNTÜRK, C. ERDEMİR'de Pota Metalurjisi Uygulamaları, TMMOB-Metalurji Dergisi 58, s.38-39, (1991)
- [58] SCHREYER, RAMM, H., WAGNER, W. Praktische Baustatik, B.G.Teubner Verlag, Teil 3, p.103-105, Stuttgart (1967)
- [59] ZURMUHL, R. Matrisler, çev. BİRKAN, İ., İTÜ Kütüphanesi sayı:1124, Çağlayan Basımevi, İstanbul, (1978)

Ek A

SEY ile problemlerin çözümüne ilişkin, eleman denklemini kurmak için gerekli karmaşık diferansiyel eşitliklerin kullanıldığı Galerkin Denklemlerinden ya da ısı iletimi/geçiş problemleri için Varyasyon Denklemlerinden yararlanılmaktadır [2, s 450].

Varyasyon hesaplamasında bir π fonksiyoneli tanımlanmaktadır. Bu fonksiyonel, Eşitlik 2.16'dan 2.18'e kadar olan diferansiyel eşitliklerine karşılık gelmektedir. Şekil 2.6'daki gibi üç boyutlu bir yapının ısı iletkenliği :

$$\pi = \int_V \frac{1}{2} \{k_x (\partial\theta/\partial x)^2 + k_y (\partial\theta/\partial y)^2 + k_z (\partial\theta/\partial z)^2\} dV - \int_V \theta q^B dV - \int_{S_2} \theta^s q^s dS - \sum_i \theta^i \zeta^i \quad (A.1)$$

Buradaki terimler, Eşitlik 2.17'deki anlamlarıyla aynıdır. ζ^i ile konsantre olmuş akımın yarattığı ısı talebi ifade edilmektedir. θ , sıcaklığı ifade eden bir değişken olarak, π 'nin kararlılığını sağlayan bir parametredir [2].

$$\int_V \delta \theta^T k \theta^T dV = \int_V \delta \theta q^B dV - \int_{S_2} \delta \theta^s q^s dS - \sum_i \delta \theta^i \zeta^i \quad (A.2)$$

$$\theta^T = [(\partial\theta/\partial x) \quad (\partial\theta/\partial y) \quad (\partial\theta/\partial z)] \quad (A.3)$$

$$k = \begin{bmatrix} k_x & 0 & 0 \\ 0 & k_y & 0 \\ 0 & 0 & k_z \end{bmatrix} \quad (A.4)$$

δ , θ^T ve k 'nin varyasyonlarını ifade etmektedir [2].

Isı iletimini en kapsamlı olarak tanımlayan, Eşitlik A.2 ile gerilme hesaplamalarında kullanılan ve virtüel (sanal) iş prensibini tanımlayan eşitliğin karşılaştırılması faydalı olacaktır. Özellikle θ 'nın varyasyonu, sanal bir büyüklük olarak ele alınabilir. Bir başka ifadeyle, $\delta\theta \equiv \theta^A$ şeklinde düşünülebilir. Bu tanım, ısı iletimi için kullanılan eşitlikle, sanal yer değiştirme prensibi arasında bir uyumluluğun varlığını ortaya koymaktadır. Bu durumda, Eşitlik A.2, ısı akımı konusunda bir denge eşitliğidir,

denilebilir. Bir başka ifadeyle; iletimle taşınan ısı miktarı, üretilmiş ısı miktarına eşittir. Bu fiziksel tanım, ısı iletiminin temelini oluşturmaktadır. Isı iletimi problemlerinin SEY ile çözümünde, bir aşamadan sonra gerilme hesaplamasına benzer özellikler gözlenmektedir [2].

Zamana bağlı olmayan ısı iletim hesabında kullanılan eşitlik, statik bir gerilme hesaplamasında kullanılan eşitlikle çok benzerdir [2, 20-21]. Eğer zamanla ilerleyen bir ısı akımı mevcutsa, bu durumda hesaplamalara hızı belirleyen terimin dahil edilmesi gereklidir. Bu hız;

$$q^c = C \cdot \theta' \quad (A.5)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Burada C, malzemenin hacim başına düşen ısı kapasitesidir. q^c , yapı içinde üretilmiş, birim hacime düşen ısı akımı miktarının (q^B) bir parçası gibi algılanabilir. Bu durum, gerilme hesaplamasındaki taşıyıcı yüklerin, hacimsel yüklerle yaptığı basınca benzetilmektedir [2, s 451].

Eşitlik A.2, incelenmek istenen herhangi bir zaman içindeki ısı akımının dengesini ifade etmektedir. Lineer ve lineer olmayan genel çözüm şemasına bakılacak olursa, zamana bağlı olmayan ve zamana bağlı problemlerin cinsine göre, bahsedilen eşitliklerin gerekli dengeyi sağlamak üzere oluşturulması oldukça önem taşımaktadır. Aynı durum, gerilme hesaplaması için de geçerlidir. t zamanı belirlenmiş ve t+Δt zamanı içindeki sıcaklıklar tespit edilmiştir. Δt, zaman ilerledikçe artmaktadır. Zamana bağlı hesaplamalarda; zamanın, integrasyonun bir fonksiyonu olarak kullanıldığı, t+Δt anı için sıcaklıkların ve ısı akış dengesinin belirlenmesinde şu ifadeden yararlanılmaktadır :

$$\int_V \theta^{t+\Delta t} k^{t+\Delta t} \theta' dV = {}^{t+\Delta t}Q + \int_{S_c} \theta^{t+\Delta t} h ({}^{t+\Delta t} \theta^s) dS + \int_{S_r} \theta^{t+\Delta t} k ({}^{t+\Delta t} \theta^s) dS \quad (A.6)$$

S_c ve S_r , t+Δt zamanı içinde konveksiyon ve radyasyon sınır şartlarını ifade eden terimlerdir. ${}^{t+\Delta t}Q$, t+Δt zamanı içinde bir uçtan bir uca ulaşan ısı akımıdır. ${}^{t+\Delta t}Q$ 'nin değeri, yüzeye kadar ulaşmış, konveksiyon ve radyasyon dışında iç kısımlarda üretilmiş olan ısı akımını (${}^{t+\Delta t}q^B$) yaratan diğer ısı akımlarının (${}^{t+\Delta t}q^s$) etkisini kapsamaktadır [2, s 451].

$${}^{t+\Delta t}Q = \int_V \theta^{t+\Delta t} {}^{t+\Delta t}q^B dV + \int_{S_2} \theta^{t+\Delta t} {}^{t+\Delta t}q^s dS \quad (A.7)$$

Aynı durumun zamana bağlı hesaplamaları için;

$${}^{t+\Delta t}q^B \Leftarrow {}^{t+\Delta t}q^B - {}^{t+\Delta t}C \cdot {}^{t+\Delta t}\theta' \quad (A.8)$$

${}^{t+\Delta t}q^B$, üretilmiş ısı miktarı içinde ısı toplama etkilerine yer vermemektedir. Zamana bağlı hesaplamalarda, zamana bağlı integrasyon alınırken, t yerine artık $t+\Delta t$ alınarak çözüme gidilmektedir [2].

Lineer hesaplamalar için genellikle, ısı akım dengeleri (${}^{t+\Delta t}k$ ve ${}^{t+\Delta t}h$) sabit büyüklüklerdir ve radyasyonla ilgili sınır şartlarını içermemektedirler [2, s 452]. Bu durum, şu şekilde ifade edilmektedir:

$$\int_V \theta^{t+\Delta t} k {}^{t+\Delta t}\theta' dV + \int_{S_e} \theta^{t+\Delta t} h {}^{t+\Delta t}\theta^s dS = {}^{t+\Delta t}Q + \int_{S_e} \theta^{t+\Delta t} h {}^{t+\Delta t}\theta_e dS \quad (A.9)$$

Lineer olmayan ısı iletimi hesaplamalarında Eşitlik A.10, $t+\Delta t$ zamanı ve bilinmeyen sıcaklıkların belirlenmesi için ideal bir eşitliktir. Bilinmeyen bu sıcaklıkların tespiti için bir yaklaşım, eşitliğin linearize edilmesiyle kazanılabilir. Tablo A.1'de de verilen bu durum için ilk adımda, -gerilme hesabında olduğu gibi- Newton-Raphson Yöntemi kullanılabilir [2].

$${}^{t+\Delta t}\theta^{(l)} = {}^{t+\Delta t}\theta^{(l-1)} + \Delta\theta^{(l)} \quad (A.10)$$

Burada başlangıç koşulu olarak; ${}^{t+\Delta t}\theta^{(0)} = {}^t\theta$ 'dir. Tablo A.1'de $\Delta\theta^{(1)}$ kullanılan yerlerde, sıcaklık artışı, θ 'dir. Newton-Raphson Yöntemi'nin tam uygulanması sonucu, Eşitlik A.6'nın kesin çözümü olanaklıdır [2, s 452]. Eğer A.10 eşitliği kullanılırsa, her iterasyonun (sayısal elemanın) başında katsayılar matrisinde yapılacak değişiklikler sonucu, pratikte zor görünmektedir. sayısal eleme yapılırken bu matris, değiştirilmeye gerek kalmaksızın yeterli çözümlerin üretilmesine, aşağıdaki eşitliğin çözülmesinden sonra izin verecektir [2].

$$\int_V \theta^{t+\Delta t} k \Delta\theta^{(l)} dV = \int_{S_e} \theta^{t+\Delta t} h \Delta\theta^{s(l)} dS + \int_{S_r} \theta^{t+\Delta t} k \theta^{s(l)} dS \Rightarrow$$

$${}^{t+\Delta t}Q + \int_{S_e} \theta^{t+\Delta t} h^{(l-1)} [{}^{t+\Delta t}\theta_e - {}^{t+\Delta t}\theta^{s(l-1)}] dS + \int_{S_r} \theta^{t+\Delta t} k^{(l-1)} [{}^{t+\Delta t}\theta_r - {}^{t+\Delta t}\theta^{s(l-1)}] dS \quad (A.11)$$

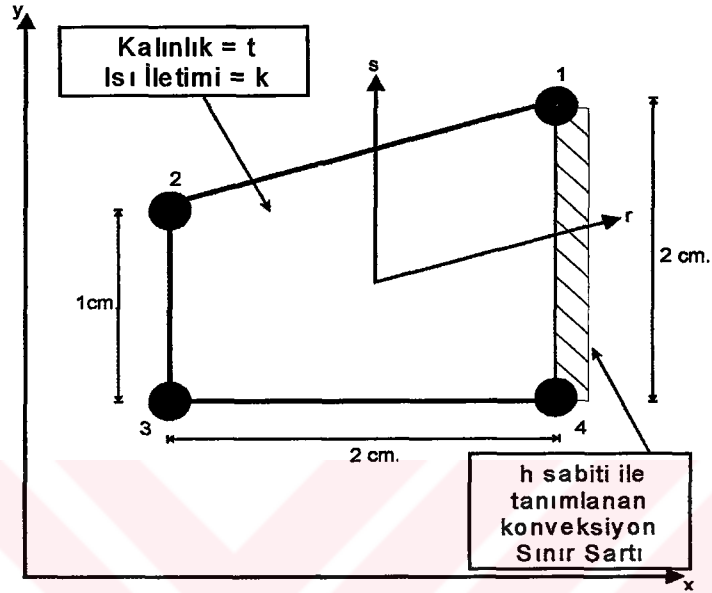
$$-\int_V \theta^{t+\Delta t} k^{(l-1)} \cdot {}^{t+\Delta t}\theta^{(l-1)} dV$$

Bunun yanı sıra, ${}^{t+\Delta t}h^{(i-1)}$, ${}^{t+\Delta t}k^{(i-1)}$ ve ${}^{t+\Delta t}k^{(i-1)}$ sırasıyla konveksiyon, radyasyon katsayıları ve ${}^{t+\Delta t}\theta^{(i-1)}$ sıcaklığına uygun düşen iletim katsayısı matrisleridir [2].

Tablo A.1 Isı iletimi/geçışı hesaplamaları için lineer olmayan eşitliklerin lineerleştirilmesi [2, s 451]

1. $t+\Delta t$ zamanı için denge şartı : $\int_V \theta^{A,T} {}^{t+\Delta t}k \cdot {}^{t+\Delta t}\theta' dV = {}^{t+\Delta t}Q + \int_{S_c} \theta^{As} {}^{t+\Delta t}h [{}^{t+\Delta t}\theta_e - {}^{t+\Delta t}\theta^s] dS + \int_{S_r} \theta^{As} {}^{t+\Delta t}k [{}^{t+\Delta t}\theta_r - {}^{t+\Delta t}\theta^s] dS$
2. Denge Şartının Lineerleştirilmesi : ${}^{t+\Delta t}\theta = {}^t\theta + \theta'$; ${}^{t+\Delta t}\theta' = {}^t\theta' + \theta''$; ${}^{t+\Delta t}k = {}^t k + k'$; ${}^{t+\Delta t}h = {}^t h + h'$; ${}^{t+\Delta t}K = {}^t K + K'$ ifadelerinin kullanımı ve ${}^{t+\Delta t}k {}^{t+\Delta t}\theta' = {}^t k {}^t\theta' + {}^t k \theta''$; ${}^{t+\Delta t}h ({}^{t+\Delta t}\theta_e - {}^{t+\Delta t}\theta^s) = {}^t h ({}^{t+\Delta t}\theta_e - {}^t\theta^s - \theta^s)$; ${}^{t+\Delta t}K ({}^{t+\Delta t}\theta_r - {}^{t+\Delta t}\theta^s) = {}^t K ({}^{t+\Delta t}\theta_r - {}^t\theta^s - \theta^s)$ ifadelerinin kabulü ile aşağıdaki sonuç ifadesi elde edilir.
$\int_V \theta^{A,T} {}^t k \cdot \theta' dV + \int_{S_c} \theta^{As} {}^t h \theta^s dS + \int_{S_r} \theta^{As} {}^t K \theta^s dS = {}^{t+\Delta t}Q + \int_{S_c} \theta^{As} {}^t h [{}^{t+\Delta t}\theta_e - {}^t\theta^s] dS$ $+ \int_{S_r} \theta^{As} {}^t K [{}^{t+\Delta t}\theta_r - {}^t\theta^s] dS - \int_V \theta^{A,T} {}^t k \cdot {}^t\theta' dV$

Ek B



Şekil B.1 4-düğümlü eleman üzerinde ısı iletiminin hesaplanması [2, s 455]

Şekil B.1'de verilen örnek, izoparametrik dört düğümlü bir elemandır. Bu eleman üzerinde ısı taşınım matrisi (K_k), konveksiyon maktrisi (K_c) ile taşınmış ısı akım vektörlerinin (${}^{tt}\Delta t Q_B$, ${}^{tt}\Delta t Q_S$) nasıl hesaplanacağı anlatılmaktadır.

Daha önce tanımları verilen H , B , H^S ve k matrislerine ihtiyaç duyulmaktadır. Sıcaklık için interpolasyon matrisi H , şekil fonksiyonuyla birlikte kullanılmaktadır.

$$H = \frac{1}{4} [(1+r)(1+s) \quad (1-r)(1+s) \quad (1-r)(1-s) \quad (1+r)(1-s)]$$

eğer, $r=1$ için H , hesaplanırsa, o zaman sonuç :

$$H^S = \frac{1}{2} [(1+s) \quad 0 \quad 0 \quad (1-s)]$$

olarak elde edilir. B'nin hesaplanmasından önce Jakobien Operatörü¹⁾ hesaplanmalıdır :

$$J = \begin{bmatrix} 1 & (1+s)/4 \\ 0 & (3+r)/4 \end{bmatrix}$$

daha sonra B için ;

$$B = \frac{1}{4} \begin{bmatrix} 1 & -[(1+s)/(3+r)] \\ 0 & [4/(3+r)] \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} (1+s) & -(1+s) & -(1-s) & (1-s) \\ (1+r) & (1-r) & -(1-r) & -(1+r) \end{bmatrix}$$

$$\Rightarrow \frac{1}{4(3+r)} \begin{bmatrix} 2(1+s) & -4(1+s) & 2(2s-r-1) & 2(2+r-s) \\ 4(1+r) & 4(1-r) & -4(1-r) & -4(1+r) \end{bmatrix}$$

son olarak ısı iletimi katsayılar matrisi;

$$K = \begin{bmatrix} k & 0 \\ 0 & k \end{bmatrix}$$

şeklinde oluşturularak hesaplanmaktadır [2].

Lineer olmayan hesaplamalarda ise yapılan işlem, 2.23 eşitliği içindeki sıcaklık ve sıcaklık gradyanı için interpolasyonların, ısı akımı bağıntılarına (A.11) uyarlanması işlemidir :

$$({}^tK^k + {}^tK^c + {}^tK^r) \Delta\theta^{(l)} = {}^{t+\Delta t}Q + {}^{t+\Delta t}Q^c(i-1) - {}^{t+\Delta t}Q^k(i-1) \quad (B.1)$$

$${}^{t+\Delta t}\theta^{(l)} = {}^{t+\Delta t}\theta^{(i-1)} + \Delta\theta^{(l)} \quad (B.2)$$

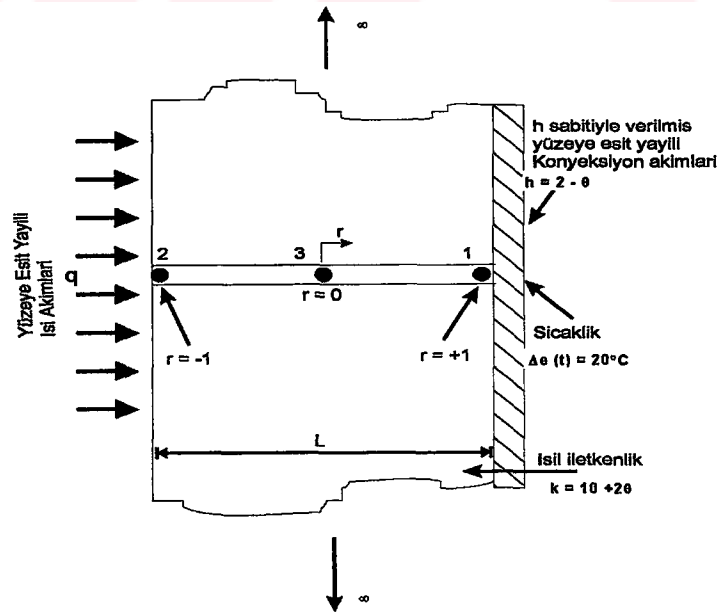
Eşitlik B.2, i. sayısal eleme sonundaki düğüm noktası sıcaklıklarını vermektedir. Eşitlik B.1 içindeki matrisler ve vektörler, tamamen A.11'deki bağıntıların kullanımının özel bir bölümünü oluşturmaktadır ve Tablo B.1'de bunlar tanımlanmışlardır. Taşınmış düğüm noktası ısı akımlarının vektörü, Eşitlik 2.28'in aynısıdır.

¹ Simetrik sistemlerde, vektör iterasyonu için kullanılmaktadır. Herbiri köşegen dışı bir $a_{ik}=a_{ki}$ ($i \neq k$) eleman çiftini sıfır yapan elementer ortogonal dönüşümlerin sonsuz bir serisi şeklindedir. Bu bir sonraki indis çiftine uygulandığında bozulabilir ancak, köşegen dışındaki tüm elemanların kareleri toplamı sürekli küçülür ve sıfıra yakınsar, böylece çözüme giden yol sağlanır [59].

Tablo B.1 Isı iletimi/geçiş problemlerinin lineer olmayan hesaplamaları için sonlu elemanlar matrisleri [2, s 456]

Integral Olarak İfadesi	Sonlu Elemanlar Olarak İfadesi
$\int_V \theta^{s,T} k \Delta \theta^{(0)} dV$ $\int_{Sc} \theta^{s,T} h \Delta \theta^{(0)} dS$ $\int_{Sr} \theta^{s,T} k \Delta \theta^{(0)} dS$ $\int \theta^{s,T} h^{(i-1)} [t^{s,\Delta t} \theta_e - t^{s,\Delta t} \theta^{s(i-1)}] dS$ $\int \theta^{s,T} k^{(i-1)} [t^{s,\Delta t} \theta_r - t^{s,\Delta t} \theta^{s(i-1)}] dS$ $\int \theta^{s,T} t^{s,\Delta t} k^{(i-1)} \cdot t^{s,\Delta t} \theta^{(i-1)} dV$	$t^k \Delta \theta^{(0)} = [\sum_m \int B^{(m)T} \cdot t^k \cdot B^{(m)} \cdot dV^{(m)}] \Delta \theta^{(0)}$ $t^k \Delta \theta^{(0)} = [\sum_m \int h^{(m)T} \cdot H^{s(m)T} \cdot H^{s(m)} \cdot dS^{(m)}] \Delta \theta^{(0)}$ $t^k \Delta \theta^{(0)} = [\sum_m \int k^{(m)T} \cdot H^{s(m)T} \cdot H^{s(m)} \cdot dS^{(m)}] \Delta \theta^{(0)}$ $t^{s,\Delta t} Q^{c(i-1)} = \sum_m \int t^{s,\Delta t} h^{(m)(i-1)} H^{s(m)T} [H^{s(m)} (t^{s,\Delta t} \theta_e - t^{s,\Delta t} \theta^{s(i-1)})] dS^{(m)}$ $t^{s,\Delta t} Q^{r(i-1)} = \sum_m \int t^{s,\Delta t} k^{(m)(i-1)} H^{s(m)T} [H^{s(m)} (t^{s,\Delta t} \theta_r - t^{s,\Delta t} \theta^{s(i-1)})] dS^{(m)}$ $t^{s,\Delta t} Q^{k(i-1)} = \sum_m \int B^{(m)T} t^{s,\Delta t} k^{(m)(i-1)} B^{(m)} t^{s,\Delta t} \theta^{(i-1)} dV^{(m)}$

Konveksiyon ve radyasyonla oluşan ısıl etkilerin yanı sıra, düğümlerde mevcut öz sıcaklıkların etkileri üzerinde de durulması gereklidir. Bu konu, gerilm hesaplamalarındaki düğüm noktası yer değiştirmeleri konusu ile benzerdir. Şimdiye kadar gelenek olduğu üzere; bilinen düğüm sıcaklıkları (örneğin, oda sıcaklığındaki malzemenin yüzeyine denk gelen düğüm noktaları gibi), 2.25 ve B.1 eşitliklerine uyarlanarak ısı akım dengesi oluşturulmaya çalışılmaktadır. Daha sonra elde edilen yeni eşitlikler, konveksiyon şartlarının incelendiği yöntemle benzer bir yöntemle hesaplanarak, düğüm noktası sıcaklıkları belirlenmektedir. Bu durum, aşağıda bir örnekle açıklanmaya çalışılmaktadır [2].



Şekil B.2 Sonsuz bir plakada ısı iletimine yönelik hesaplamalar [2, s 457]

Şekil B.2'de görülen sonsuz rijit plaka üzerinde SEY için gerekli ısısal denge kurulmuştur. Burada zamana bağlı olmayan durum söz konusudur. Plakanın modellenmesinde aslında pratikte çok daha fazla gerekmesine rağmen- yalnızca parabolik tek boyutlu, bir eleman kullanılmaktadır. Problemin çözümü için, Eşitlik B.1'den yararlanılacaktır:

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

Burada;

$${}^tK^k = \int_V B^T {}^t k^B dV$$

$${}^tK^c = \int_{Sc} {}^t h H^s T H^s dS$$

$${}^{t+\Delta t}Q^{c(i-1)} = \int_{Sc} {}^{t+\Delta t} h^{(i-1)} H^s T [H^s ({}^{t+\Delta t}\theta_e - {}^{t+\Delta t}\theta^{s(i-1)})] dS$$

$$\Rightarrow {}^{t+\Delta t}Q^{k(i-1)} = \int_V B^T [{}^{t+\Delta t}K^{(i-1)} \cdot B^{t+\Delta t} \theta^{(i-1)}] dV$$

$$\Rightarrow {}^{t+\Delta t}Q^T = [0 \quad q \quad 0]$$

$$\Rightarrow \Delta\theta^{(i)T} = [\Delta\theta_1^{(i)} \quad \Delta\theta_2^{(i)} \quad \Delta\theta_3^{(i)}]$$

$$\Rightarrow {}^{t+\Delta t}\theta^{(i-1)T} = [{}^{t+\Delta t}\theta_1^{(i-1)} \quad {}^{t+\Delta t}\theta_2^{(i-1)} \quad {}^{t+\Delta t}\theta_3^{(i-1)}]$$

$$\Rightarrow {}^{t+\Delta t}\theta_e^T = [20 \quad 0 \quad 0]$$

$$\Rightarrow {}^{t+\Delta t}\theta^{s(i-1)T} = [{}^{t+\Delta t}\theta_1^{(i-1)} \quad 0 \quad 0]$$

Tek boyutlu parabolik eleman için, H'nın oluşturulmasında kullanılacak şekil fonksiyonları olan h_1 , h_2 ve h_3 kullanıldığında :

$$h_1 = 1/2r(1+r), h_2 = -1/2r(1-r), h_3 = 1-r^2.$$

$$H = [1/2r(1+r) \quad -1/2r(1-r) \quad (1-r^2)]$$

H^s , şekil içinde 1 numaralı düğüme uygun düşmektedir. 1 numaralı düğüm $r = +1$ olduğundan, bu düğüm için;

$$H^s = [1 \quad 0 \quad 0]$$

sonucu ortaya çıkmaktadır. $J = L/2$ kullanılması sonucunda ise;

$$B = 2/L \quad [1/2(1+2r) \quad -1/2(1-2r) \quad -2r]$$

Plaka malzemesine ait ısı iletim katsayılar matrisi aşağıdaki eşitliğin kurulması sonucu elde edilir:

$${}^tK = 10 + 2 \sum_{i=1}^3 h_i {}^t\theta_i$$

Benzer şekilde konveksiyon katsayıları matrisi ise, şu şekilde bulunur;

$${}^th|_{r=1} = 2 - {}^t\theta_1$$

Buradan sonra gerekli matrislerin hesaplanması sonucu düğüm noktası sıcaklıkları rahatlıkla hesaplanmaktadır [2, s 458].



Ek C

```
! FEMGEN/FEMVIEW Version 2.3 Release 09  
! Installed for : TU Graz  
! History file for model : POTA  
! SESSION STARTED AT 9 Jul 96  
FEMGEN ST  
GEOMETRY POINT COORD P1 0  
GEOMETRY POINT COORD P2 1.6 0  
GEOMETRY POINT COORD P3 1.753 3.5  
GEOMETRY POINT COORD P4 1.467 3.5  
GEOMETRY POINT COORD P5 1.427 2.59  
GEOMETRY POINT COORD P6 1.373 .626  
GEOMETRY POINT COORD P7 1.341 .626  
GEOMETRY POINT COORD P8 1.329 .349  
GEOMETRY POINT COORD P9 0 .349  
EYE FRAME
```

Buraya kadar olan kısımda geometrik modele ait nokta koordinatları verilmiştir.

```
EYE ZOOM IN .436 .303 .72 .831  
GEOMETRY LINE STRAIGHT L1 P1 P2  
GEOMETRY LINE STRAIGHT L2 P2 P3  
GEOMETRY LINE STRAIGHT L3 P3 P4  
GEOMETRY LINE STRAIGHT L4 P4 P5  
GEOMETRY POINT COORD P10 1.459 2.59  
GEOMETRY LINE STRAIGHT L5 P5 P10  
GEOMETRY LINE STRAIGHT L6 P10 P6  
GEOMETRY LINE STRAIGHT L7 P6 P7  
GEOMETRY LINE STRAIGHT L8 P7 P8  
GEOMETRY LINE STRAIGHT L9 P8 P9  
GEOMETRY LINE STRAIGHT L10 P9 P1  
EYE FRAME
```

Bu kısımda nokta koordinatları birleştirilerek modelin geometrik çizimi sağlanmaktadır. Noktalar birleştirilirken, izlenecek yön, seçime göre ya saat yönünde veya ters yönde olmalıdır. Bu şekilde, daha sonra 'mesh generation' işlemi sırasında oluşturulacak elemanların lokal eksenlerinin aynı ve global eksenle uyumlu olmasını sağlamaktadır.

```
LABEL GEOMETRY LINES  
LABEL GEOMETRY AXES  
LABEL GEOMETRY OFF  
LABEL GEOMETRY POINTS
```

```
LABEL GEOMETRY LINES
EYE ZOOM IN .419 .3 .718 .85
LABEL GEOMETRY POINTS
LABEL GEOMETRY LINES
LABEL GEOMETRY SURFACES
VIEW GEOMETRY ALL
LABEL GEOMETRY SURFACES
```

Model geometrisine ilişkin gerekli ince ayarlamalar yapılmıştır.

```
MESHING TYPES ALL QU8 4
```

Geometrik modelin ağ yapısına (elemanlara) bölünmesi aşamasına gelinmiştir. 'mesh generation' işlemi öncesi hangi tür eleman seçileceği saptanmış ve 8-düğümlü, eksenel simetrik eleman kullanılmıştır (Şekil 5.5).

```
MESHING GENERATE
W0135: 2699 new nodes and 840 new elements generated
```

Geometrik model, 840 elemana bölünerek, artık Sonlu Elemanlar Modeli halini almıştır.

```
VIEW GEOMETRY ALL
! ENTER TITLE =>
Stahlgusspfanne
INDEX
! DO YOU WANT TO SAVE CURRENT MODEL =>
YES
! SESSION ENDED
```

Ek D

GEO.DAT

INIT

RSET

YES

TEXT

*Zwei Textzeilen eingaben

*** → S. Yılmaz, H.F. Schweiger

*weitere Eingabe

*** → MgO-C/MgO, standart, zamana bağlı olmayan durum

GVAR

*** → model içinde kullanılan eleman özelliklerinin belirtilmesi.

EN

INTF

FGFILE

*** → oluşturulacak dosya

EXIT

TOPO.DAT

ELSL

*NAN,NEN,NST

*** → model içindeki elemanların okutulması (eleman sayısı)

EN

EXIT

HMB.DAT

INIT

RSET

REFL

*IHDIR,HNULL

*** → eksenel tanımlamalar

POT

EN

MAT

MAAS

*NAN,NEN,NST,MTYPE

*** → model içindeki hangi elemanların 1. Malzeme tipine ait olduğunun belirlenmesi

EN

MADF

TYPE

*MTYPE,MTEXT

1, MgO-C cüruf seviyesi aşınma astarı

GPAR

*KEN,RK1,RK2,RK3,SPH,Q

→MgO-C olan 1. malzeme özelliklerinin
belirtilmesi (ısı iletim katsayısı v.b. gibi)

TEMP

*NDIAK,NDIAC,NDIAQ

1***
→hesaplamaların zaman, sıcaklık, basınca bağlı olup-
olmaması durumunun belirtilmesi

EN

MAAS

*NAN,NEN,NST,MTYPE

→model içindeki hangi elemanların 2. Malzeme tipine ait
olduğunun belirlenmesi

EN

MADF

TYPE

*MTYPE,MTEXT

2, MgO çalışma seviyesi aşınma astarı

GPAP

*KEN,RK1,RK2,RK3,SPH,Q

→MgO olan 2. malzeme özelliklerinin
belirtilmesi (ısı iletim katsayısı v.b. gibi)

TEMP

*NDIAK,NDIAC,NDIAQ

2***
→hesaplamaların zaman, sıcaklık, basınca bağlı olup-
olmaması durumunun belirtilmesi

EN

MAAS

*NAN,NEN,NST,MTYPE

→model içindeki hangi elemanların 3. Malzeme tipine ait
olduğunun belirlenmesi

EN

MADF

TYPE

*MTYPE,MTEXT

3, alüminalı emniyet astarı

GPAP

*KEN,RK1,RK2,RK3,SPH,Q

→alümina olan 3. malzeme özelliklerinin
belirtilmesi (ısı iletim katsayısı v.b. gibi)

TEMP

*NDIAK,NDIAC,NDIAQ

3***
→hesaplamaların zaman, sıcaklık, basınca bağlı olup-
olmaması durumunun belirtilmesi

EN

MAAS

*NAN,NEN,NST,MTYPE

→model içindeki hangi elemanların 4. Malzeme tipine ait
olduğunun belirlenmesi

EN

MADF

TYPE

*MTYPE,MTEXT

4, şamot izolasyon astarı

GPAP

*KEN,RK1,RK2,RK3,SPH,Q

*** →şamot olan 4. malzeme özelliklerinin belirtilmesi (ısı iletim katsayısı v.b. gibi)

TEMP

*NDIAK,NDIAC,NDIAQ

4*** →hesaplamaların zaman, sıcaklık, basınca bağlı olup-olmaması durumunun belirtilmesi

EN

MAAS

*NAN,NEN,NST,MTYPE

*** →model içindeki hangi elemanların 5. Malzeme tipine ait olduğunun belirlenmesi

EN

MADF

TYPE

*MTYPE,MTEXT

5, çelik manto katmanı

GPAP

*KEN,RK1,RK2,RK3,SPH,Q

*** →çelik olan 5. malzeme özelliklerinin belirtilmesi (ısı iletim katsayısı v.b. gibi)

TEMP

*NDIAK,NDIAC,NDIAQ

5*** →hesaplamaların zaman, sıcaklık, basınca bağlı olup-olmaması durumunun belirtilmesi

EN

EN

DIAG

TEMP

*KURVE

1

*T,RATIO →1. malz. ısı iletiminin sıcaklıkla değişim eğrisi tanımlanır

EN

*KURVE

2

*T,RATIO →2. malz. ısı iletiminin sıcaklıkla değişim eğrisi tanımlanır

EN

*KURVE

3

*T,RATIO →3. malz. ısı iletiminin sıcaklıkla değişim eğrisi tanımlanır

EN

*KURVE

4

*T,RATIO

→4. malz. ısı iletiminin sıcaklıkla değişim eğrisi tanımlanır

EN

*KURVE

5

*T,RATIO

→5. malz. ısı iletiminin sıcaklıkla değişim eğrisi tanımlanır

EN

EN

EN

BOUN

POTB

ELEM

*NAN,NEN,NST,LSIDE,KURP,PFIX

→pota iç kısmındaki elemanların ve sınır şartlarının tanımlanması

→pota dış kısmındaki elemanların ve sınır şartlarının tanımlanması

EN

EN

EN

EXIT

HAPO.DAT

SUBD

*NSUB,IPRINT

→alt yapı numarası

*NAN,NEN,NST

EN

SUBA

NSU,KEN,IOPTI,IPREL,IBEGEL

→SE-hesaplamalarının yapıldığı eliminasyon işlemlerine yönelik seçimlerin yapılması

EXIT

HRES.DAT

STAT

*NSTAT,TO

→hesaplamaların türünün (zamana bağlı olmayan, zamana bağlı olan) belirlenmesi

OUTP

*IPR, ISTORE,IGRD,IFLUX,JTEST,NURECK

COMP

→hesaplama

EXIT

HNOST.DAT

CTRL

*NSU,LFNR,IPRD,IPRS,MODE,NSTRP,NSEQ,IERREST

SPEC

*ITEM,IMASS,INTEGR,IGINT,IEXTRA,MODE1,MAXITE,ITEST

COMP

EXIT

HPLOT.DAT

Sonuçların renklendirilmesi, boyutlandırılması, şekillendirilmesi, sunulması ve çizilmesi gibi konuların düzenlendiği aşamayı oluşturmaktadır.

UTIL.DAT

FEMV

SUBS

*NUMSUB

→alt yapı numarası

MONA

*MODEL NAME

→sonuçların gösterileceği model dosyasının adı

CASE

*LCASE

→yüklerin depolanacağı dosyanın adı

GEO

NRES

POT

→sıcaklık dağılımı sonuçları

VELO

→sıcaklık gradyanı sonuçları

EN

EN

EN

EXIT

Ek E

GEO.DAT

INIT

RSET

YES

TEXT

*Zwei Textzeilen eingaben

*** →S. Yılmaz, H.F. Schweiger

*weitere Eingabe

*** →MgO-C/MgO, standart, zamana bağılı olmayan durum

GVAR

*** →model içinde kullanılan eleman özelliklerinin belirtilmesi

EN

INTF

FGFILE

*** →oluşturulacak dosya

EXIT

TOPO.DAT

ELSL

*NAN,NEN,NST

*** →model içindeki elemanların okutulması (eleman sayısı)

EN

EXIT

MB.DAT

INIT

YES

PROP

SPEC

*NAN, NEN, NST, ISPA, ITRUS, THIC

*** →model içindeki hangi elemanların hangi malzeme tipine ait olduğunun belirlenmesi

MADF

TYPE

* MTYPE, MTEXT

1, cüruf bölgesi aşınma astarı (MgO-C)

GPAR

* E1,CNY1,ALPT,RHO

*** →1.malzeme tipine ait fiziksel özellikler (E-modül, poisson sayısı,termal genleşme katsayısı)

APAR

*NREMOD,NRALFA,NTM

→1.malzeme (MgO-C) için; E-modül-sıcaklık diyagram
numarası, termal genleşme-sıcaklık diyagram numarası, belirli
bir zaman aralığı için diyagram numarası

LAWS

*LAW, LAW1,LAWST,NJOINT,LAWFL,LAWINT[1],...[2],...[3],...[4]..

→malzeme kanunu belirleme (lineer elastik, visko plastik v.b.)

PROT

TYPE

* MTYPE, MTEXT

2,sıvı çelik çalışma bölgesi aşınma astarı (MgO)

GPAP

* E1,CNY1,ALPT,RHO

→2.malzeme tipine ait fiziksel özellikler (E-modül, poisson
sayısı,termal genleşme katsayısı)

APAR

*NREMOD,NRALFA,NTM

→2.malzeme (MgO) için; E-modül-sıcaklık diyagram
numarası, termal genleşme-sıcaklık diyagram numarası, belirli
bir zaman aralığı için diyagram numarası

LAWS

*LAW, LAW1,LAWST,NJOINT,LAWFL,LAWINT[1],...[2],...[3],...[4]..

→malzeme kanunu belirleme (lineer elastik, visko plastik v.b.)

PROT

TYPE

* MTYPE, MTEXT

3, emniyet astarı (yüksek alüminalı)

GPAP

* E1,CNY1,ALPT,RHO

→3.malzeme tipine ait fiziksel özellikler (E-modül, poisson
sayısı,termal genleşme katsayısı)

APAR

*NREMOT,NRALFA,NTM

→4.malzeme (MgO-C) için; E-modül-sıcaklık diyagram
numarası, termal genişleme-sıcaklık diyagram numarası, belirli
bir zaman aralığı için diyagram numarası

LAWS

*LAW, LAW1,LAWST,NJOINT,LAWFL,LAWINT[1],...[2],...[3],...[4]..

→malzeme kanunu belirleme (lineer elastik, visko plastik v.b.)

TYPE

* MTYPE, MTEXT

5,çelik manto

GPAP

* E1,CNY1,ALPT,RHO

→5.malzeme tipine ait fiziksel özellikler (E-modül, poisson
sayısı, termal genişleme katsayısı)

APAR

*NREMOT,NRALFA,NTM

→5.malzeme (MgO-C) için; E-modül-sıcaklık diyagram
numarası, termal genişleme-sıcaklık diyagram numarası, belirli
bir zaman aralığı için diyagram numarası

LAWS

*LAW, LAW1,LAWST,NJOINT,LAWFL,LAWINT[1],...[2],...[3],...[4]..

→malzeme kanunu belirleme (lineer elastik, visko plastik v.b.)

PROT

EN

TEMP

* kurve,ntims

→1.malzeme için diyagram numarası ve nokta sayısı

EN

* temps, ratio

→1 .malzeme için sıcaklık-termal genişleme diyagramı

TEMP

* kurve,ntims

→2.malzeme için diyagram numarası ve nokta sayısı

EN

* temps, ratio

→2.malzeme için sıcaklık-termal genişleme diyagramı

TEMP

* kurve,ntims

→3.malzeme için diyagram numarası ve nokta sayısı

EN

* temps, ratio

→3.malzeme için sıcaklık-termal genişleme diyagramı

TEMP

* kurve,ntims

→4.malzeme için diyagram numarası ve nokta sayısı

EN

* temps, ratio

→4.malzeme için sıcaklık-termal genişleme diyagramı

TEMP

* kurve,ntims

*** →5.malzeme için diyagram numarası ve nokta sayısı

EN

* temps, ratio

*** →5.malzeme için sıcaklık-temal genleşme diyagramı

EN

EN

EN

DOF

RE

* NAN,NEN,NST,ISE,IFG1,IFG2,IFG3,IFG4,IFG5,IFG6,ISUP

*** →modelin hareket edemeyeceği/sabit olduğu bölgelerin
(elemanların ve/veya düğümlerin) tanımlanması (restraint)

EN

REFG

*FGFILE

*** →*.ANL dosya adı verilmesi

EN

EN

EXIT

APO.DAT

SUBD

*NSUB,IPRINT

*** →alt yapı numarası

*NAN,NEN,NST

EN

SUBA

NSU,KEN,IOPTI,IPREL,IBEGEL

*** →SE-hesaplamalarının yapıldığı eliminasyon işlemlerine
yönelik seçimlerin yapılması

EXIT

ST.DAT

ELST

*NAN,NEN,NST,MGAUS, NGAUS, LGAUS, I1, I2

*** →eleman rijitlik matrisinin okutulması/oluşturulması

EN

EXIT

ELIM.DAT

M3ELIM

COMP →yapılan işlemlerin doğruluğunun sınanması

EN

EXIT

LOAD.DAT

CASE

*LFNR, KZU, NHA, NS

*** →yükleme durumu numarası

* Beschreibenen Text zum Lastfall

*** →1-hidrostatik basınç hesaplaması, 2-termal genleşme hesaplaması

TYPE

DSFL

* NOLA, FAKT, DIAGR, CYCL, DELTA_T

*** →yükleme ile ilgili bilgiler (tekil yük, yayılı yük, hidrostatik yük v.b.)

TYPE

DSFL

* NAN,NEN,NST,KENN,KENN1,K1,K2,K3,K4,IDIR,IMMER

*** →hidrostatik yüklemenin yönü, şiddeti, hangi elemanların etkilendiği v.b. bilgilerin girilmesi

(termal genleşme hesaplaması için de benzer bir uygulama sözkonusudur

'DSFL' yüzeye yayılı yükleri tanımlamada kullanılmaktadır, termal gerilmeler için bunun yerine 'TL' seçilmelidir)

EN

EN

EXIT

RES.DAT

ELAS

*LFVON,LFBIS,LFSTEP

*** →hesaplamalarda kaçınıcı yüklenme durumunun kullanılacağını belirlenmesi

COMP

→hesaplama

EXIT

NOST.DAT

CTRL

*NSU,LFNR,IPRD,IPRS,MODE,NSTRP,NSEQ,IERREST

COMP

EXIT

UELAG.DAT

DEFC
NUMB
*LFNR,NSU,LTEXT

EN
COMB
OUTP
*IPRD,IPRS,IPRINC,IAUSNU

EXIT

UTIL.DAT

FEMV
SUBS
*NUMSUB
*** → alt yapı numarası
MONA
*MODEL NAME
*** → sonuçların gösterileceği modelin adı
CASE
*LCASE → yüklerin depolanacağı dosyanın adı

GEO
NRES
DEFO → gerilim/yer değiştirme dağılımı sonuçlarının gösterilmesi
EN
EN
EXIT

ÖZGEÇMİŞ

1968 yılında İstanbul'da doğmuştur. Liseyi İstanbul Kasımpaşa Lisesi'nde bitirdikten sonra, 1985 yılında girdiği İstanbul Teknik Üniversitesi (İTÜ), Metalurji Mühendisliği Bölümü'nden 1989 yılında mezun olmuştur.

Aynı yıl İTÜ ve Alman GTZ Kuruluşları arasındaki işbirliği çerçevesinde başlatılan Almanca Yüksek Lisans Programı'na, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Metalurji A.B.D'da başlamıştır. 1991'de program gereği olarak Berlin Teknik Üniversitesi'nde ve Almanya'da kurulu çeşitli fabrikalarda staj ve teknik gezilere katılmıştır.

1992 yaz döneminde İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü'nden Yüksek Mühendis diploması almış ve aynı yılın sonunda İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Metalurji Mühendisliği A.B.D Üretim Metalurjisi Programı'nda açılmış olan doktora sınavlarını kazanmıştır. 1994 yılında doktora yeterliliği elde ederek 'Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY) ile Çelik Potaları Refrakter Astarının Termal, Mekanik ve Termomekanik Davranışlarının İncelenmesi ve Geliştirilmesi' konulu tez çalışmasına başlamıştır. 1995-96 yıllarında SEY ile çalışma tekniklerini öğrenmek ve tez çalışmasını gerçekleştirmek üzere Avusturya Hükümeti'nin sağladığı Akademik Değişim Programı Bursu ile Graz Teknik Üniversitesi'nde bulunmuştur.

Halen İTÜ Kimya-Metalurji Fakültesi Metalurji Mühendisliği Bölümü Üretim Metalurjisi A.B.D.'nda Araştırma Görevlisi olarak çalışmaktadır. Bugüne kadar Ulusal ve Uluslararası Metalurji/Seramik sempozyum ve kongrelerinde sunulmuş 5 bildirisinin yanı sıra, yurt dışında yayınlanan dergilerden 'Stahl und Eisen' da yayımlanmış 2 makalesi bulunmaktadır. Makalelerden biri, Aachen'daki 40. Refrakter Kolloquium'unda bildiri olarak sunulmuş ve derginin Eylül 1997 'Özel' sayısında yayımlanmıştır.