

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELEKTRO CÜRUF ERGİTME PROSESİ VE PROSESİN
MODELLENMESİ

Ufuk ÖNEMLİ

FBE Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı Üretim Programında
Hazırlanan

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Ahmet EKERİM

İSTANBUL, 2007

İÇİNDEKİLER

Sayfa

SİMGE LİSTESİ	iv
KISALTMA LİSTESİ	v
ŞEKİL LİSTESİ	vi
ÇİZELGE LİSTESİ	vii
ÖNSÖZ	viii
ÖZET	ix
ABSTRACT	x
1. GİRİŞ	1
2. ESR PROSESİ	3
2.1 İnküzyonlar	4
2.1.1 İç kaynaklı inküzyonlar	5
2.1.2 Dış kaynaklı inküzyonlar	5
2.2 Cüruf Çeşitleri	5
2.3 ESR Prosesinde Kullanılan Cüruf Özellikleri	9
2.3.1 Metalürjik özellikler	9
2.3.2 Ergime noktası	9
2.3.3 Özgül elektriksel direnci	9
2.3.4 Cürufun viskozitesi	11
2.4 ESR Cüruflarının Kullanım Şartları	11
2.4.1 Depolama ve raf ömrü	11
2.4.2 Havada tekrar kurutma	12
2.5 Metot Özellikleri	13
2.6 ESR Fırın Çeşitleri	16
2.6.1 Kılavuz sistemleri	16
2.6.2 Durağan dökme kalıp sistemleri.	16
2.6.3 Külçe çekme sistemleri	16
2.6.4 Hava basıncı kontrolü/vakum sistemleri.	17
2.6.5 Atmosferik koruma sistemleri	17
2.7 ESR Prosesinin Varyasyonları	18
2.7.1 Basınç altında elektro cüruf ergitme (PESR)	18
2.7.2 Etkisiz gaz atmosferinde ergitme (IESR).	19
2.7.3 Vakum altında elektro cüruf ergitme (VAC-ESR).	21
2.8 ESR Yöntemiyle Üretilen Malzemelerin Kullanım Alanları	22
3. MODELLEME İÇİN ELEKTRO CÜRUF ERGİTME METODUNU KONTROLÜ	22
3.1 Elektro-Cüruf Tekrar Ergitme İşlemi (ESR) İçin Isı Transfer Modeli	23
3.2 Cürufun Isı Transfer Modeli	25
3.3 Elektrotun Ergime Dinamiklerinin Modellenmesi	27

4.	MODELLEME VE SİMÜLASYON	32
5.	SONUÇLAR VE TARTIŞMA	39
	KAYNAKLAR	40
	EKLER.....	42
	ÖZGEÇMİŞ	47

SİMGE LİSTESİ

A_e	Elektrotun enine kesitinin alanı
C_e	Elektrot malzemesinin spesifik ısısı
C_s	Cürufun spesifik ısısı
D	Batırma derinliği
He	Elektrotun eşit termal katsayısı
h_m	Elektrotun ergime sıcaklığı spesifik entalpisi
HS	Cürufun eşit termal katsayısı
hs	Cürufun yüksekliği
h_{sup}	Elektrotun aşırı ısınma spesifik entalpisi
I	Giriş akımı
K_e	Elektrot malzemesinin termal iletkenliği
L^*	Elektrotun faz değişim sıcaklığı
P_m	Ergime kuvveti (elektrota P iletim)
P_{sup}	Aşırı ısınma sıcaklığında elektrotun yoğunluğu
re	Elektrotun yarıçapı
rm	Potanın yarıçapı
S_e	Faz değişiminin meydana geldiği erime çizgisi/cephesi
T_m	Elektrotun ergime sıcaklığı
T_r	Oda sıcaklığı
T_s	Cürufun sıcaklığı
T_{ss}	Cürufun ergime sıcaklığı
V_s	Cürufun hacmi
ε	Cürufun salım gücü
ρ_e	Elektrot malzemesinin yoğunluğu
ρ_s	Cürufun yoğunluğu
σ	Stefan-Boltzman sabit değeri

KISLTMA LİSTESİ

ASTM	Amerikan Standartlar Enstitüsü
ELH	Ekstra Düşük Hidrojen
ESR	Elektro Cüruf Ergitme
IESR	Etkisiz Gaz Atmosferinde Ergitme
PESR	Basınç Altında Elektro Cüruf Ergitme
VAC	Vakum Ark Ergitme

ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa
Şekil.2.1 Elektro cüruf prosesinin şematik gösterilişi	3
Şekil 2.2 CaO, Al ₂ O ₃ , CaF ₂ üçlü faz diyagramı	7
Şekil 2.3 CaO, Al ₂ O ₃ , CaF ₂ üçlü faz diyagramı	8
Şekil 2.4 CaO, Al ₂ O ₃ , CaF ₂ üçlü faz diyagramı	8
Şekil 2.5 ESR 2015 Cürufunun sıcaklık-iletkenlik değişimi	10
Şekil 2.6. Nem içeriği, Kurutma sıcaklığı grafiği.....	13
Şekil 2.7 Geleneksel yöntem ve ESR yöntemi ile üretilmiş çeliklerin mekanik özellikleri ..	15
Şekil 2.8 Külçe çekimleri için toparlanabilen madeni levhayla ESR fırını	17
Şekil 2.9 PESR fırının şematik gösterimi	19
Şekil 2.10 IESR fırının şematik gösterimi.	20
Şekil 2.11. VAC-ESR fırının şematik gösterimi	21
Şekil 3.12 ESR işleminde cürufun enerji dengesi.	24
Şekil 3.13 Elektrot için enerji dengesi ve koordinat ayarı	24
Şekil 3.14 ESR işleminin batmazlık ve batırma derinliği modelinin tanımı	30
Şekil.4.15 İngot Yüzeyindeki Sıcaklık Değişimi.....	38
Şekil.4.16 İngot Eksenindeki Sıcaklık Değişimi.....	38

ÇİZELGE LİSTESİ

	Sayfa
Çizelge 2.1 ESR cüruflarının kimyasal içerikleri	6
Çizelge 2.2 ESR 2015 Cürufunun 1600°C-1900°C arasındaki özgül elektriksel direnci	10
Çizelge 2.3 Cüruf çeşitlerinin 1700°C deki özgül elektriksel dirençleri $\Omega^{-1}\text{cm}^{-1}$	11
Çizelge 2.4 ESR prosesinin uygulama alanları ve etkileri	14

ÖNSÖZ

Çalışmalarında bana yol gösteren Prof. Dr. Ahmet EKERİM' e, maddi, manevi desteklerini benden esirgemeyen aileme ve tüm arkadaşlarıma teşekkür ederim.

ÖZET

Günümüz teknolojisinde ilerlemek farklı üretim metotları bulup, bunları geliştirmekle mümkündür. Standart iyileştirme yöntemlerinden birisi de rafinasyondur. Elektro Cüruf Ergitme (ESR) prosesi de bir çeşit rafinasyon metodu olup, metal endüstrisinde süper alaşımlar ve özel çelik döküm ingotları üretiminde kullanılmaktadır. Bu yöntem ile elde edilen malzemelerin kalitesi, saflık derecesi ve mikro yapı özellikleri gelişmiştir.

Yapılan çalışmada ESR prosesi tanımlanmış, proses de kullanılan cüruf özellikleri belirtilmiştir. Ayrıca ESR cürufların kullanım şartları ve yöntemleri incelenmiştir. ESR prosesinin uygulandığı farklı fırın tipleri gösterilmiştir. Çeşitli ESR proseslerine yer verilip, bu prosesler arasındaki farklılıklara değinilmiştir.

Projenin deneysel çalışma kısmında modelleme ve simülasyon yaklaşımı yapılmıştır. Modellemede cüruf altı ergitme yöntemi kullanılarak dökülen ingottaki sıcaklık dağılımı gösterilmiştir

Anahtar Kelimeler: Elektro Cüruf Ergitme (ESR), ESR’ de kullanılan cüruf özelliği, ESR’nin uygulandığı fırınlar, ESR modelleme ve simülasyon

ABSTRACT

Nowadays technological developments are available with inventions of different production methods and their improvements. One of the standard development method is rafination . Electro Slag Remelting (ESR) is a type of rafination method, which is metal industry to produce super alloy and special steel cast ingots. Quality, purity and micro structure of materials are advanced which is produced by using this method.

In this study ESR process is defined and properties of the slag which is used in the process are determinated. Also application conditions and methods are described. Various furnaces types of ESR processes are shown. Differences between varied ESR processes are dealt with.

In practical part of the study modeling and the simulating approach are made. In modeling part slag below melting method is used for temperature distribution of the cast ingot is figured.

Key Words: Electro Slag Remelting (ESR), ESR slag properties, ESR furnace, ESR modeling and simulating

1. GİRİŞ

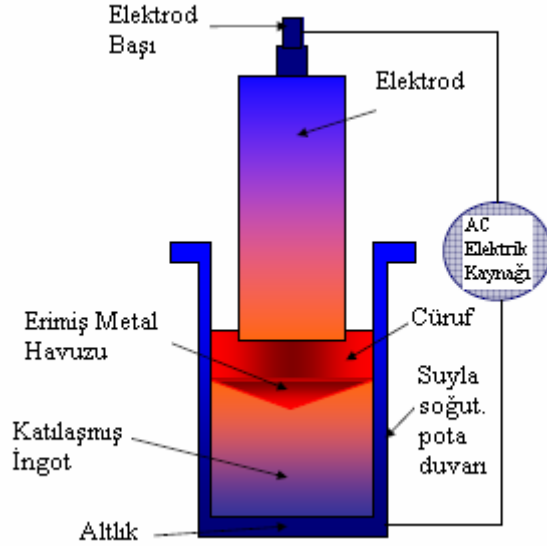
İlerleyen teknoloji her geçen gün daha nitelikli ve özel malzemeler gerektirmektedir. Nitelikli malzemelerin üretimi için standart üretim yöntemlerinin iyileştirilmesinin yanı sıra bu yöntemlere ek olarak rafinasyon yöntemlerini de kullanmaya itmektedir. Bu rafinasyon yöntemlerinde biriside elektro cüruf ergitmedir. Bu yöntemin kullanılmaya başlanması 50 yıllık bir sürece dayansa da bu konudaki ilerleme teknoloji ile paralel olarak devam etmiştir. Bu gelişmeler cürufun özelliklerinin araştırılması ve prosesin modernleştirilerek veriminin artırılması ile önem kazanmıştır. 1992 yılında yapılan araştırmalarda Wei Chiho ve Xiang Shunhua cürufun elektriksel iletkenliğinin önemini ortaya koymuş ve $\text{CaF}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$ ve $\text{CaF}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CaO}$ sistemlerinden oluşan cürufların elektriksel iletkenliğini ölçmüşlerdir. Bu araştırmalarında aynı zamanda cürufun iletkenliğini azaltan ve arttıran etkenleri ve birleşenleri de ortaya koymuşlardır. 2002 yılında Aghazadeh Mohandesi ve M.H. Shahosseinie işlevsel çelik özelliklerini geliştirmek için elektro cüruf ergitme prosesini kullanarak paslanmaz çelik lamine kompozitleri yapmak için yeni bir yöntem tanıtmışlardır. İlerleyen yıllarda bu prosesin kontrolünün insanlardan makinelere geçmesini sağlamak için yapılan çalışmalar önem kazanmıştır.

Teknolojideki gelişimin hızlanması bilgisayar ve programcılık sektörünün ilerlemesi ile geliştirilen programlar yapılan birçok bilimsel çalışmaya ışık tutmuş ve bu çalışmalara yön vermiştir. Bu programlar sayesinde deneylerde elde edilen veriler hızlı bir şekilde değerlendirilmekte hatta deney ve üretim ortamları canlandırılarak (simülasyon programları yardımı ile) en iyi sonuçların alınması sağlanmaktadır. 2002 yılında Tae Gyoon Lim ve Chang Woo Reeu elektro cüruf prosesinin otomatik kontrolünü sağlamak için cimonx programı yardımı ile proses koşullarını kontrol etmişlerdir. Bu otomatik kontrol sistemi ile standart bir kontrol şeması ortaya konmuştur. ESR prosesi boyunca 2 tonluk ingotun beş saatlik işlem süresince durumu da bu program yardımıyla izlenebilmektedir. Bu konuda yapılan çalışmalarda bir tanesi de 2005 yılında Dr. Seokyoung Ahm' nin ESR prosesinin matlab programında modellenmesi ve bir kontrol mekanizması seçilerek simüle edilmesi üzerine bir tez hazırlamıştır.

Bugüne kadar yapılan bu çalışmalar ESR prosesinin önemini ortaya koymaktadır. Yapılan çalışmada prosesin tanımı, kullanım alanları, varyasyonları ve bu prosesle üretilen ürünler araştırılmıştır. Prosesinin matematiksel ve fiziksel modelinden yararlanarak hazırlanan programda, ESR yöntemiyle dökülen ingottaki sıcaklık dağılımını belirlemektedir.

2. ESR PROSESİ

Her geçen gün artan yüksek performanslı mühendislik malzemelerine olan talebi karşılamak için yaşanan rekabet ortamında, düşük maliyetli yüksek kaliteli çelikleri üretmek için çalışmalar yapılmaktadır. Çeliğin üretim ve dökümü esnasında oluşan ve istenmeyen sıvı veya katı olarak metalik olmayan bileşikler çeliğe karışabilmektedir. İnklüzyon olarak adlandırılan metalik olmayan bileşikler çelik ürünün içerisinde farklı birleşim, şekil, boyut ve miktarlarda bulunabilirler. Herhangi bir şekilde çelik içerisine karışan inklüzyonlar şekil, bileşim, yoğunluk ve boyutlarına bağlı olarak çeliğin yüzey özellikleri, derin çekme, yorulma, darbe dayanımı ve kopma dayanımı gibi mekanik özelliklerini olumsuz yönde etkilerler. Bu olumsuz etkileri gidermek için kullanılan yöntemlerinin başında elektro cüruf ergitme yöntemi bulunmaktadır. ESR 1930' lu yıllarda yüksek saflıkta külçeler üretmek amacı ile bulunmuş bir yöntemdir. Bu metodu öncelikle 1954 yılında U.S.S.R' de Paton Elektrik Kaynak kurumu tarafından geliştirilmiş ve daha sonra endüstriyellemiştir(Lim ve Reeu, 2002) .



Şekil.2.1 Elektro cüruf prosesinin şematik gösterilişi (Ahm, 2005)

Şekil 2.1'de görüldüğü gibi dökülmüş ingotlar elektrotlar gibi görev görür. Elektrotlar elektrikle ısıtılan sıvı cüruf banyosuna batırılır ve metal elektrot erir. Ergimiş metal

damlacıkları sıvı cüruf içerisinde geçerken safsızlıklar (imprüteler) ve mineral inklüzyonlar damlacıklardan cürufa geçer, yani rafine işlemi olur. Rafine edilen metal damlacıkları yeniden ergitilmiş ingotun üst kısmında toplanır ve ergimiş metal kontrollü olarak soğutularak katılaşır. Isı, bakır kalıp çevresindeki soğutma suyuna geçerek ergimiş metalin katılaşması sağlanır. ESR metalleri (blokları) çekme boşluksuz olur, izotropik olur ve çok yüksek temizlik derecesi gösterir. ESR' den çıkmış çeliklerden yapılan parçaların servis ömrü çok uzun olur, yüksek sağlamlık gösterir. ESR ingotları temizlik derecesi ve mikro yapıları açısından homojendirler ve kalıplara dökülen çeliklerde sağlanan akma mukavemetlerinden çok daha yüksek akma mukavemetine sahiptirler. Bu özellikler dahilinde ESR ürünleri geniş bir kullanım alanına sahiptir.

Metotta kullanılan cüruf elektrotun erimesine yardımcı olacak sıcaklığı yaymak, arındırmak, sıvı metali korumak ve dökme kalıp çizgilerini belirlemek için kullanılır. Yapılan çalışmalar göz önüne alındığında görülmektedir ki elde edilen ürün özelliklerini birinci derecede etkileyen faktör cüruf özellikleridir. Cürufun fiziksel ve kimyasal özellikleri ürün kalitesini olumlu ya da olumsuz yönde etkileyebilmektedir. Yapılan birçok araştırmada cürufun kompozisyonu, elektriksel iletkenliği, eğrime özelliği gibi konulara değinilmektedir. Ürün özellikleri cüruf özelliklerinin yanı sıra zamana, ürüne ve çalışana göre değişmektedir. ESR prosesi yaklaşık 5 saat sürdüğü için çalışma koşulları zordur, ürün değerini etkileyen birçok parametre mevcuttur, eğrime ve katılaşma gibi önemli noktaların sona ermesi ve başlangıç bölümlerinde süre belirsizliği bulunmaktadır.

2.1 Inklüzyonlar

ASTM, E7' ye göre, inklüzyon, mekanik olarak tutulan oksit, sülfid, silikat ve benzeri veya katılaşma sırasında oluşan veya katı metal içinde katılaşma sonucu oluşan empüritelerin partikülleridir. Dış kaynaklı inklüzyon, sıvı çelik içerisinde, yabancı maddelerin sıkışması ile oluşan metal dışı bileşiklerdir. İç kaynaklı inklüzyon, (çözünmeyen metalik olmayan fazların katılaşma veya katılaşmadan sonra (sülfitlerin), katılaşmadan önce veya katılaşma sırasında katılaşan (oksitler) kalıntı oksijenle birleşmesinden oluşan doğal çökeltilerdir) sıvı çelikten çökelen iç kaynaklı maddelerdir. Inklüzyonlar tip ve kalınlıklarına göre sınıflandırılırlar. ASTM-E-45'e göre, inklüzyon tipleri ve seviye farklılıkları esasına göre A, B, C ve D olarak

ayrılmaktadır. Bu inklüzyonlar, katılaşma süresince sülfidin çökmesi ve çeliğin deoksidasyonundan gelen iç kaynaklı deoksidasyon tipleridir. Gri'ye göre (görüntü analizinde, ekranda taranacak özelliğe karşılık gelen siyah ve beyaz arasındaki renk aralığıdır) inklüzyon tipleri birbirlerinden ayrılmaktadırlar(Ünal, 2001).

2.1.1 İç kaynaklı inklüzyonlar

Çelik üretim sırasında reaksiyon etkisiyle oluşan inklüzyonlar iç kaynaklı inklüzyonlardır. Inklüzyonun bileşimini çeliğin bileşimi belirler. Fakat Al ile söndürülmüş çeliklerde, $Al \geq 0.008$ olan çeliklerde, Al_2O_3 ve Mn ve S ile söndürülmüş çeliklerde SiO_2 veya $MnO.SiO_2$ 'dir. Çeliğe Ti katılırsa TiN oluşur. TiN paslanmaz çeliklerde ve IF-çeliklerinde de problem oluşturur. MnS, AlN ve çeşitli karbürler dökümün soğuma ve katılaşma sırasında oluşurlar. İç kaynaklı inklüzyonlar her zaman oksijen giderici ve deoksidantın verilen miktarı ile denge halindedir. İç kaynaklı inklüzyonlar kullanılan deoksidantın tipine bağlı olarak sıvı veya katı fazda bulunabilirler (Ünal, 2001).

2.1.2 Dış kaynaklı inklüzyonlar

Dış kaynaklı inklüzyonlar refrakter erozyonu ve cüruf sıkışması gibi çeliğin dışından kaynaklanan inklüzyonlardır. Dış kaynaklı inklüzyonların oluşumları cüruf -metal arayüzeyindeki türbülans veya dökümü yapılan çelik ve refrakter arasındaki uygunsuzluklarla ilgilidir. Dış kaynaklı inklüzyonlar refrakter veya cüruf örtüsünün elementlerini veya her ikisinin elementlerini içeren karmaşık oksitlerdir. Çoğu dış kaynaklı inklüzyon sıkışmış sıvı cüruf veya cüruf ve çeliğin refrakter ile reaksiyonu sonucu oluşan reaksiyon ürünleri oldukları için sıvıdırlar. Termal şok veya aşınma gibi nedenlerden refrakter hasarı sonucu katı inklüzyonların olması mümkündür. Dış kaynaklı inklüzyonların kaynağına bağlı olarak boyutları 20–50 μm . arasında değişir. Son 5 yılda Betlehem's Burns Harbour Plant' de, iç kaynaklı inklüzyonların oluşum sebeplerini azaltmak için birçok çalışma yapılmış ve şimdi ürün hatalarının çoğunluğunda sadece küçük dış kaynaklı oksitli inklüzyonlar görülmektedir (Ünal, 2001).

2.2 Cüruf Çeşitleri

Rafine edilecek malzemelerin kimyasal içeriğine ve safsızlık durumuna göre farklı cüruf tipleri proses de kullanılmak üzere tercih edilmektedir. Cüruf seçimi için cürufun

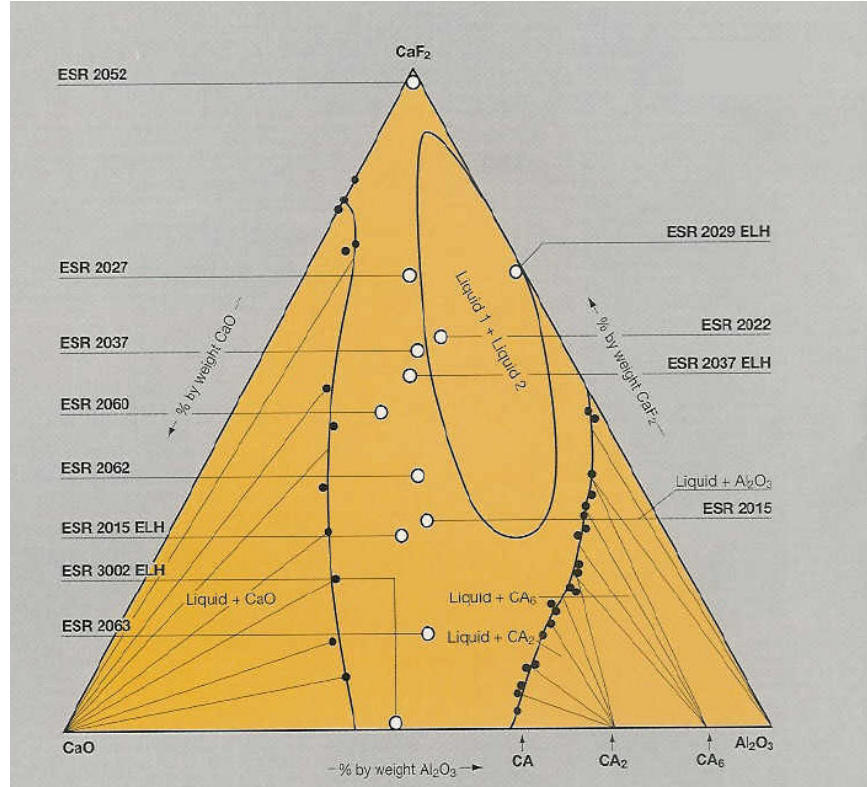
özelliklerinin değerlendirilmesi ve doğru cürufun seçilmesi prosesin başarısı için önemlidir. Çizelge 2.1’ de örnek cüruf tipleri ve bu cürufların kimyasal içerikleri verilmektedir. Cürufları oluşturan ana birleşikler CaO , Al_2O_3 , CaF_2 olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu ana birleşiklere ek olarak ergime, iletkenlik, viskozite gibi önemli özellikleri etkileyecek birleşiklerde cüruf kompozisyonuna eklenmektedir.

Çizelge 2.1 ESR cüruflarının kimyasal içerikleri [1]

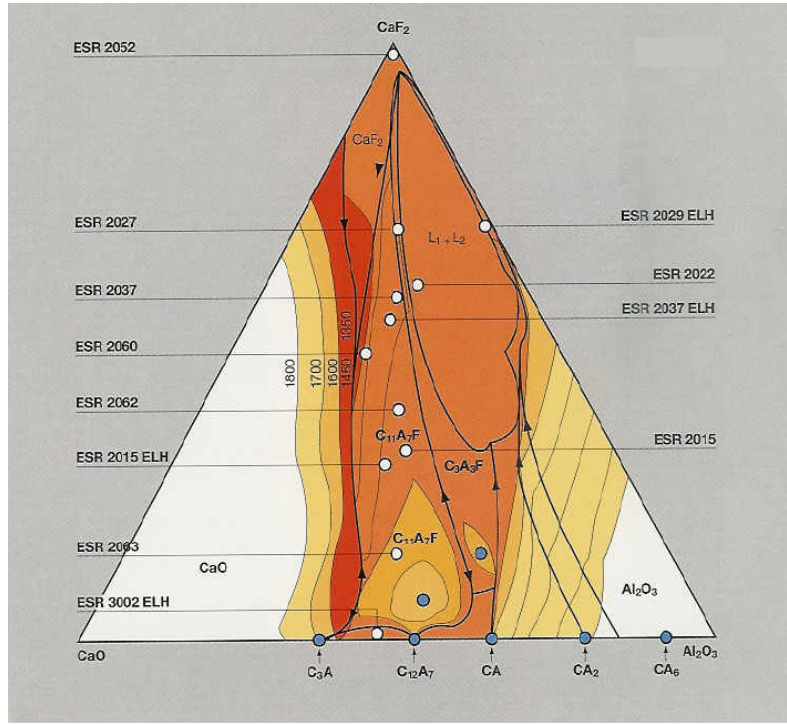
ESR Cüruf Tipleri	% SiO_2	% Al_2O_3	% FeO	% TiO_2	% $\text{CaO} + \text{MgO}$	% CaO	% MgO	% CaF_2	% H_2O (650 °C)	% C	% P	% S	Pb ppm	Bi ppm
ESR 2015	1.5 ± 0.5	33.5 ± 2.5	≤ 0.2	≤ 0.2		29.5 ± 2.5	3.0 ± 1.0	31.5 ± 2.5	≤ 0.06*	≤ 0.06	≤ 0.005	≤ 0.04	≤ 50	
ESR 2022	1.5 ± 0.5	23.0 ± 2.0	≤ 0.2			15.0 ± 2.0	2.0 ± 1.0	58.0 ± 3.0	≤ 0.06*	≤ 0.06	≤ 0.005	≤ 0.04	≤ 50	
ESR 2027	≤ 0.5	15.0 ± 1.5	≤ 0.15	≤ 0.2	17.0 ± 2.0		≤ 1.5	67.0 ± 3.0	≤ 0.06*	≤ 0.025	≤ 0.005	≤ 0.025	≤ 2	≤ 2
ESR 2037	≤ 0.6	20.5 ± 1.5	≤ 0.15	≤ 0.2	20.0 ± 2.0		≤ 2.0	58.0 ± 3.0	≤ 0.06*	≤ 0.025	≤ 0.005	≤ 0.03	≤ 2	≤ 2
ESR 2052	≤ 0.5	≤ 1.5	≤ 0.2			≤ 2.0		Min 97.0	≤ 0.005*	≤ 0.03	≤ 0.005	≤ 0.03	≤ 2	≤ 2
ESR 2059	≤ 0.6	22.0 ± 2.0	≤ 0.15	3.0 ± 0.6		20.0 ± 2.0	5.0 ± 0.8	48.0 ± 3.0	≤ 0.06*	≤ 0.03	≤ 0.005	≤ 0.03	≤ 2	≤ 2
ESR 2060	≤ 0.6	20.0 ± 2.0	≤ 0.2			27.0 ± 2.0	3.0 ± 1.0	48.0 ± 3.0	≤ 0.07*	≤ 0.06	≤ 0.005	≤ 0.04	≤ 2	≤ 2
ESR 2062	≤ 0.6	30.0 ± 2.0	≤ 0.15			28.0 ± 2.5	2.5 ± 0.5	38.0 ± 3.0	≤ 0.06*	≤ 0.03	≤ 0.005	≤ 0.03	≤ 2	≤ 2
ESR 2063	1.5 ± 0.5	41.5 ± 2.5	≤ 0.2	≤ 0.2	41.5 ± 2.5		4.0 ± 0.6	14.5 ± 1.5	≤ 0.06*	≤ 0.06	≤ 0.005	≤ 0.04	≤ 50	
ESR 2065	≤ 0.8	30.0 ± 2.0	≤ 0.3	≤ 0.8	30.0 ± 2.0		≤ 1.0	38.5 ± 3.5	≤ 0.15*	≤ 0.03	≤ 0.01	≤ 0.03	≤ 10	≤ 10
ESR 2072	22.0 ± 2.0	≤ 0.5	≤ 0.5	≤ 0.2		21.0 ± 2.0	12.0 ± 1.5	44.0 ± 3.0	≤ 0.06*	≤ 0.06	≤ 0.005	≤ 0.03		

Şekil 2.2, 2.3, 2.4’ de CaO , Al_2O_3 , CaF_2 üçlü faz sistemleri gösterilmektedir. Bütün şekillerde örnek cürufların faz diyagramdaki yerleri belirtilmiştir. Şekil 2.2’ de 1600 °C deki izotermal

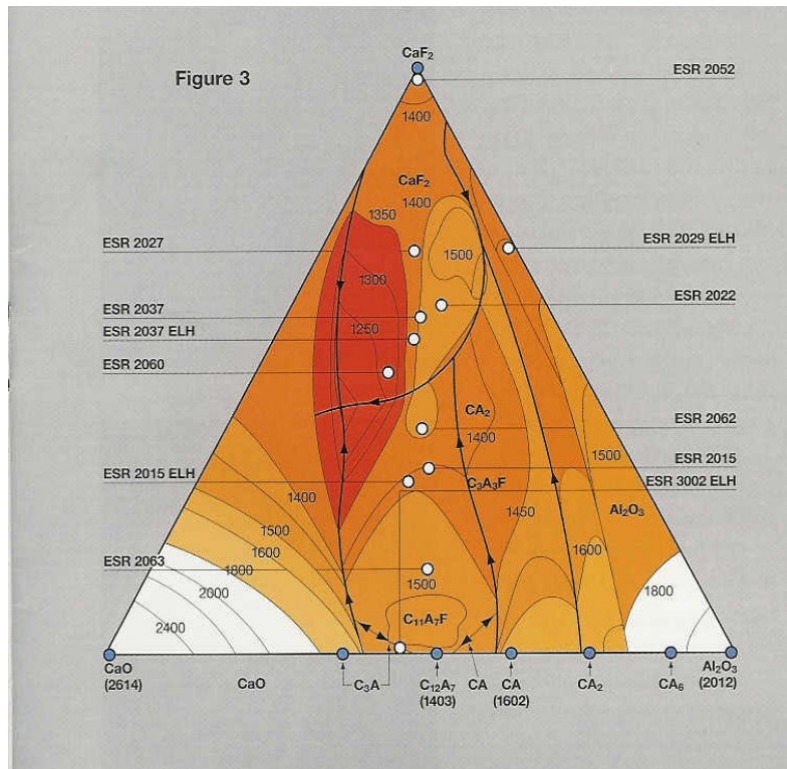
kesiti göstermektedir. ESR 2022 cürufu hariç diğer tüm örnek cüruflar tek fazlı sıvı bölgededir ve karalıdır. ESR 2022 cürufu monafaz bölgesine çok yakındır.(sıvı-sıvı birleşme aralığındadır.) Şekil 2.3 ve 2.4 deki faz diyagramlarına bakarak izotermal erime noktalarıyla, elektro yeniden ergitilmiş cüruflarının erime davranışlarını anlamak mümkündür.



Şekil 2.2 CaO, Al₂O₃, CaF₂ üçlü faz diyagramı [1]



Şekil 2.3 CaO, Al₂O₃, CaF₂ üçlü faz diyagramı [1]



Şekil 2.4 CaO, Al₂O₃, CaF₂ üçlü faz diyagramı [1]

2.3 ESR Prosesinde Kullanılan Cüruf Özellikleri

Erimiş cürufun ESR cüruf sitemlerinde seçiminin nedenlerinden bir tanesi erimiş cürufun elektriksel iletkenliğidir. Cürufun önemini dirençli bir ortamda etkili bir şekilde elektrik enerjisini ısı enerjisine çevirerek sisteme yeterli ısı üretmesini ve vermesiyle şüphesiz arttırılabilir. Bu ısı aynı zamanda tekrar eritme ve arıtma işlemini kolayca gerçekleşmesini sağlamaktadır. ESR yönteminde kullanılan farklı birleşimdeki cürufların olmasına karşın bu cüruflar ortak özelliklere sahiptirler. Bu ortak özellikler ESR prosesinde kullanılan bütün cürufların sahip olması gereken özellikler olarak da düşünülebilir. Bu özellikler;

- Ergime noktası metalinkinden düşük olmalıdır.
- Elektriksel anlamda etkin olmalıdır.
- Tekrar ergime noktasında uygun viskozitesi olmalıdır.

2.3.1 Metalürjik özellikler

Cürufun bileşiminin seçimi, bir taraftan ergime olayı esnasında çeliğin analizi mümkün olduğu kadar değişmeyecek diğer taraftan çeliğin arzu edilmeyen refakat elemanlarından optimal olarak temizlenecek şekilde hedeflenmelidir.

2.3.2 Ergime noktası

Yüzey ve temizlik derecesi bakımından en iyi neticeyi garantilemek için, Cürufun ergime noktası ergiyen alaşımların ergime noktasından yüksek olmamalıdır. Cürufun ergimesi sonucunda özgül ağırlığı daha yüksek olan çelik cüruftan geçer ve tabanda katılaşmaya başlar.

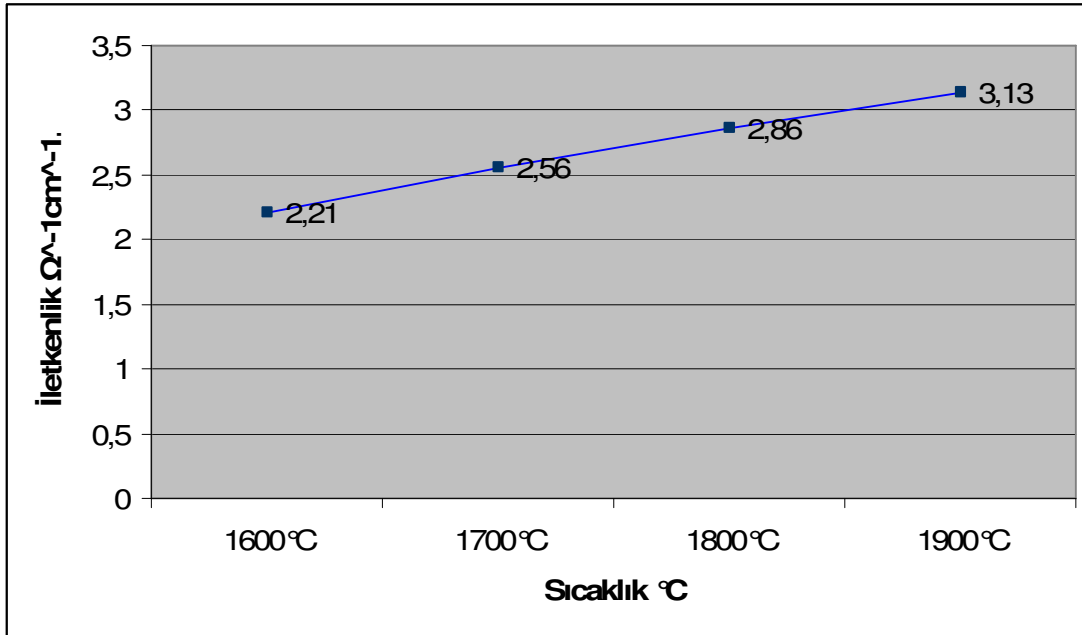
2.3.3 Özgül elektriksel direnci

Spesifik elektrik dayanımı ve ye spesifik elektrik iletkenliği, cürufun erime verimliliğinin önemli bir göstergesidir. Cürufun özgül direnci ne kadar fazla olursa ergime olayı da o kadar ekonomik olur. Çizelge 2.2' de ESR cürufunun 1600°C ile 1900°C arasındaki elektriksel iletkenlik değişimi görülmektedir. Çizelge 2.2'deki değerler kullanılarak Şekil 2.5 elde edilmiştir. Şekil 2.5'de ESR 2015 cürufunun sıcaklığa göre iletkenlik değişimi görülmektedir. Çizelge 2.3'de ise cüruf çeşitlerinin 1700°C deki özgül elektriksel dirençleri görülmektedir. Sıcaklık artışı cürufun özgül elektriksel direncini doğru orantılı olarak etkilemektedir Özgül

elektrik direnci az olan cüruflarda mecburen yüksek akımla çalışılır, bu da iletken bağlantılardaki kaybı artırır. Düşük elektrik direnci olan cüruflar yüksek iletkenlik sağladığından cüruf banyosunun ısı kayıpları kokile alınır. Şimdiye kadar edinilen tecrübelerden Demir-Nikel ve Kobalt bazlı alaşımlar için temel olarak 3 çeşit cüruf tipinin kafi geldiği söylenebilir. Cürufun analizini mevcut olan alaşım elemanlarına göre ayarlamak için, küçük münasebetlerde modifikasyon yapılabilir.

Çizelge 2.2 ESR 2015 Cürufunun 1600°C-1900°C arasındaki özgül elektriksel direnci ($\Omega^{-1}\text{cm}^{-1}$) [1]

ESR 2015ELH CÜRUFUNUN 1600°C VE 1900°C SICAKLIKLARI ARASINDAKİ ÖZGÜL ELEKTRİKSEL DİRENCİ $\Omega^{-1}\text{cm}^{-1}$				
SICAKLIK	1600°C	1700°C	1800°C	1900°C
İLETKENLİK	2,21	2,56	2,86	3,13



Şekil 2.5 ESR 2015 Cürufunun sıcaklık-iletkenlik değişimi ($\Omega^{-1}\text{cm}^{-1}$)

Çizelge 2.3 Cüruf çeşitlerinin 1700°C deki özgül elektriksel dirençleri $\Omega^{-1}\text{cm}^{-1}$ [1]

Cüruf Tipleri	1700°C
ESR 2015	2,2
ESR 2059	3,5
ESR 2015 ELH	2,5
ESR 2022	3,8
ESR 2060	3,8
ESR 2029 ELH	3,5
ESR 2027	4,6
ESR 2062	2,9
ESR 2037 ELH	3,8
ESR 2037	4,0
ESR 2063	1,4
ESR 3002 ELH	0,9
ESR 2052	6,8

2.3.4 Cürufun viskozitesi

İnklüzyonların metalden cüruf içerisine alına bilmesi homojen bir yapının proses genelinde sağlanabilmesi için cürfun viskozitesinin düşük olması gerekir. Akışkanlığı yüksek olan eriyik haldeki cüruf metal içindeki inklüzyonların cüruf içerisine alınmasını kolaylaştıracaktır.

2.4 ESR Cüruflarının Kullanım Şartları

ESR cürufları ya yüksek dayanımlı sıkıştırılmış olarak yapılan 20 kg lık torbalarda ya da 210 kg lık çelik varillerde paketlenir. Paketleme seçimi ne kadar miktarın saklanmış olduğuna, saklama koşullarının olanaklılığına ve cürufun türüne bağlıdır.

2.4.1 Depolama ve raf ömrü

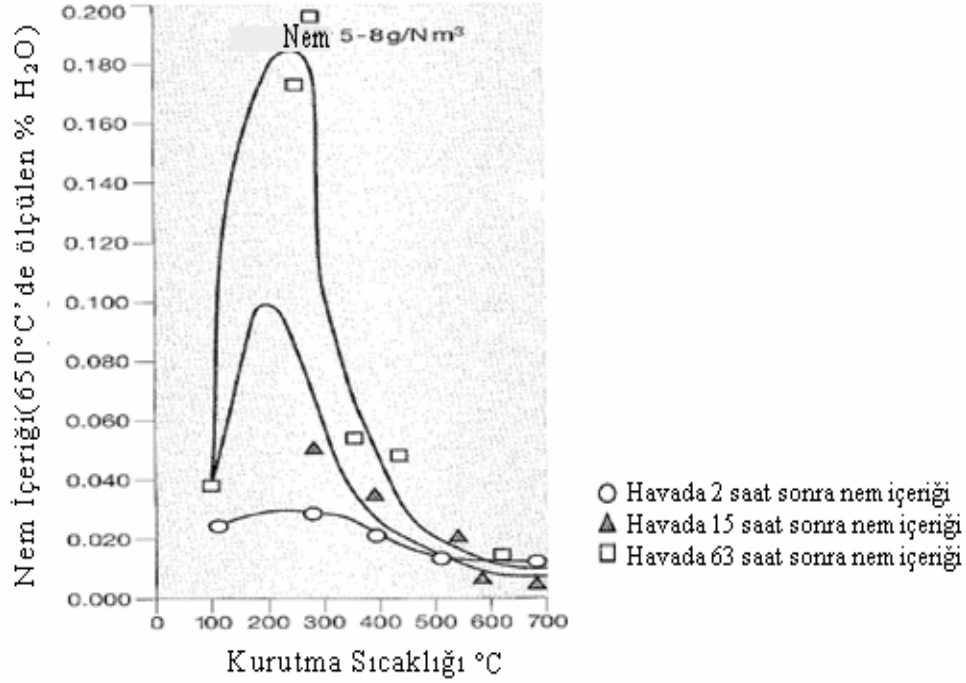
ESR cürufları bir ergime prosesi ürünüdür ve yoğun tane yapısına sahiptir. Çoğu cüruflar havadaki neme duyarlı (CaO içeriği) olmasından dolayı, eğer nemli ortamda sevk edilirse cüruflar hidrat hale gelir. Nem emiliminden korumanın en iyi yolu zarar gelmeden ve uygun

şekilde çelik variller ile sevk etmektir. Cüruflar hava geçirmez nemsiz ortamlarda olursa raf ömrü sınırsızdır. Torbalarda sevk edildiğinde er ya da geç nem emer. Havasız ortamda depolara sevk edildikten sonra, ESR 2015 cürufunun 650 derecedeki nem oranları; 2 ay % 0,03–0,04, 8 ay %0,04–0,05, 23 ay %0,06– 0,07 şeklindedir. ELH sınıfları, tam tersi olarak oda sıcaklığında neme duyarlı değildir. Torbalarda sevk edilse bile çok az nem emerler.

2.4.2 Havada tekrar kurutma

Normalde ön ergitmeli ESR cüruflarının bekletilmeden kullanılması gereklidir. Hidrojene kısmen duyarlı ya da büyük boyutlardaki külçe halindeki çeliklerin yeniden ergitilmesi için cürufun tekrar kurutulması tavsiye edilir.

Kurutma sıcaklığı en az 700 derece olmalıdır ve cüruf bu sıcaklıkta 2 saat kalma lıdır. Biz kurutmadan sonra ESR cürufunu hemen kalıba almayı ve yeniden ergitme prosesini başlatılması gerekir. Bu durum Şekil 2.6’ da kanıtlanmıştır. 100°C den 400°C sıcaklık aralığında, kalsiyum alüminat, havada nemsiz cürufun tepkimesi içinde mevcuttur; eğer hava nemli ise bir miktar nem emilimi beklenebilir. 120°C -300°C sıcaklık aralığı özellikle kritiktir. 700°C’ de flüorür ve benzer hidroliz tepkimeleri meydana gelir. $\text{CaF}_2 + \text{H}_2\text{O} = \text{H}_2\text{F}_2 + \text{CaO}$ cüruf nemli havada kurutulduğu zaman denklemde görüldüğü gibi , çok reaktif olan CaO çok hızlı bir şekilde havadan çok daha fazla nem alır. Hidrojen duyarlı çeliklerde ilk yeniden ergitme, ocaklarda daima kuru havayla yapılmalıdır.



Şekil 2.6. Nem içeriği, Kurutma sıcaklığı grafiği [1]

2.5 Metot Özellikleri

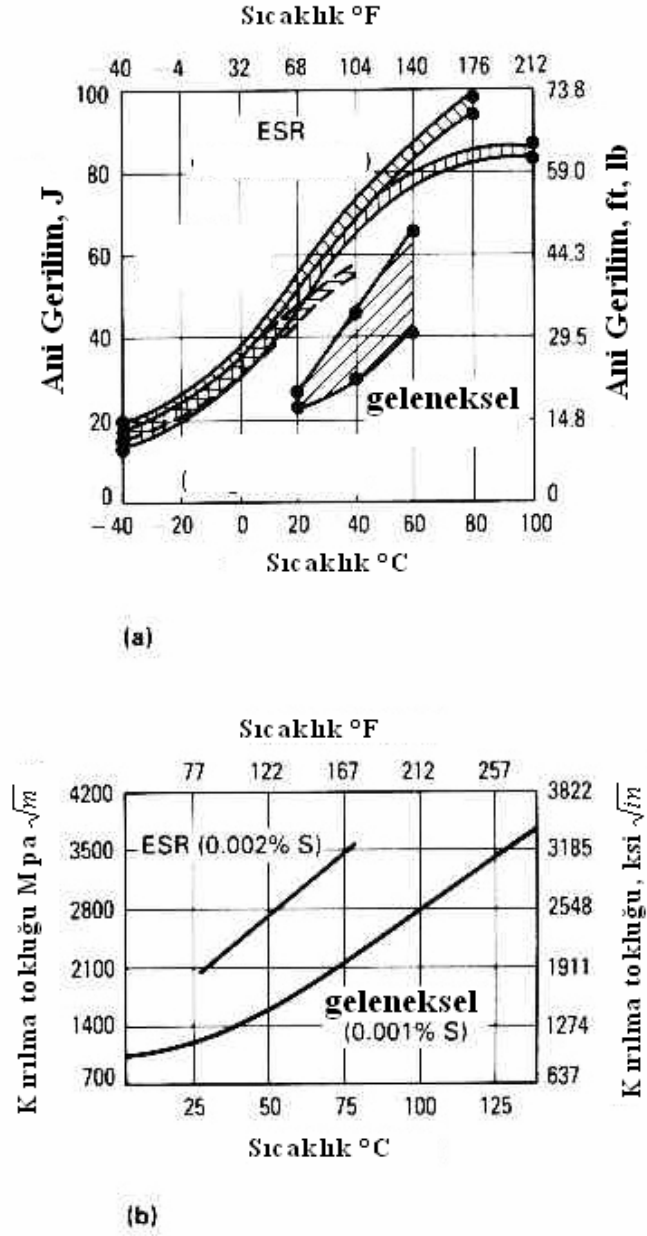
Genellikle ESR metodu çok yüksek, geçerli ve tahmin edilebilir bir ürün kalitesi sunmaktadır. Kontrol altına alınan katılaştırma sağlamlığı ve yapısal doğruluğu geliştirmektedir. Külçe yüzeyinin kalitesi ergitme işlemi süresince dökme kalıp duvarı ile külçe arasındaki katılaştırılan ince cüruf yüzeyi ile geliştirilmektedir. Bu yüzden ESR ağır dövme gibi nükleer ve atmosfer mühendisliği gibi endüstri alanlarında kullanılan yüksek performanslı süper maden alaşımları için tercih edilen üretim yöntemidir. Çizelge 2.4'de ESR prosesinin uygulama alanları ve etkileri yer almaktadır. Mühendisliğin diğer branşları hız ayarlayıcı ileri teknolojiler ya da yenileri üzerinde ısrarla durmaktadır, son olarak ESR ile en fazla gelişen yüksek saflık seviyeleri elde edilebilmektedir. ESR prosesinin genel özelliklerini sıralar isek;

- 100 kg dan 165 ton ölçüsüne kadar külçe ağırlıkları,
- Akımın ergitme enerjisinin ergitme akımında 3 kA dan 92 kA ya değişimi,
- Ergitilen materyallere bağlı olarak 170 mm den 2300 mm ye değişen külçe çapları
- Daire, kare ve dikdörtgen külçe şekillerinin olabilirliği,
- ALD basınç, koruyucu gaz ya da vakumun altında değişik ergime metotları sunar.

Çizelge 2.4 ESR prosesinin uygulama alanları ve etkileri

ÜRÜN	TİPİK ÖZELLİK	GELENEKSEL PROSESLER SONRASI YAŞANAN PROBLEMLER	ESR PROSESİNİN ETKİLERİ
SOĞUK RULOLAR	80CrMo7	Metal olmayan kalıntılar ve yüzey kalıntıları	Yüksek sertlik,uzun kullanım süresi,tam kontrollü üretim
BİLYELİ YATAK	100Cr6 100CrMo85	Garantilenmiş temiz yüzey,	İyileştirilmiş karbür ayrımı,katılaşma sırasındaki çatlakları engelleme
PERVANELER	26NiCrMoV145	Metal olmayan kalıntılar	Yüksek dayanıklılık
TÜRBİN VE JENARATÖR MİLLERİ	30NiCrMoV511 X20CrMoV121	Merkezde tane büyümesi, sınırında tane çökmesi	Kontrollü tane büyümesi, kalıntılarda azalma
TÜRBİN BİÇAKLARI	34CrNiMo6	Metal dışı kalıntılar,yüksek sıcaklıkta deformasyon,	Kalıntıda kayda değer azalma, çok önemli mekanik özellikler yüksek süneklik
YÜKSEK SICAKLIK ÇELİKLERİ	X40CrMoV51	Yüksek sıcaklıkta deformasyon ve istenmeyen reaksiyonlar	Uzun kullanım süresi, sıcaklık altında yüksek mukavemet
YÜKSEK HIZ ÇELİKLERİ	S6-5-2	Zayıf düzenlilik, düzensiz şekil değiştirme	Yüksek karbon içeriği, düzenli karbürler
PASLANMAZ ÇELİKLER	X2CrNi189	Düşük yüzey kalitesi, düşük derecede temizlik	Yüksek korozyon direnci, gelişmiş nitrür temizliği
ISIYA DAYANIKLI ÇELİKLER	X17CrMoVNb121	Yetersiz temizlik oranı, yüksek ferrit içeriği, yapı düzensizliği	İyileştirilmiş dayanıklılık, mikroyapıda yüksek stabilite

Şekil 2.7 de geleneksel yöntem sonucu üretilmiş çelik ile ESR prosesinden sonucu rafine edilen çeliğin ani yük altındaki dayanımı ve kırılma tokluğu değerleri karşılaştırılarak sunulmaktadır.



Şekil 2.7 Geleneksel yöntem ve ESR yöntemi ile üretilmiş çeliklerin mekanik özellikleri [2]

2.6 ESR Fırın Çeşitleri

Beş çeşit ESR fırını geliştirilmiştir;

2.6.1 Kılavuz sistemleri

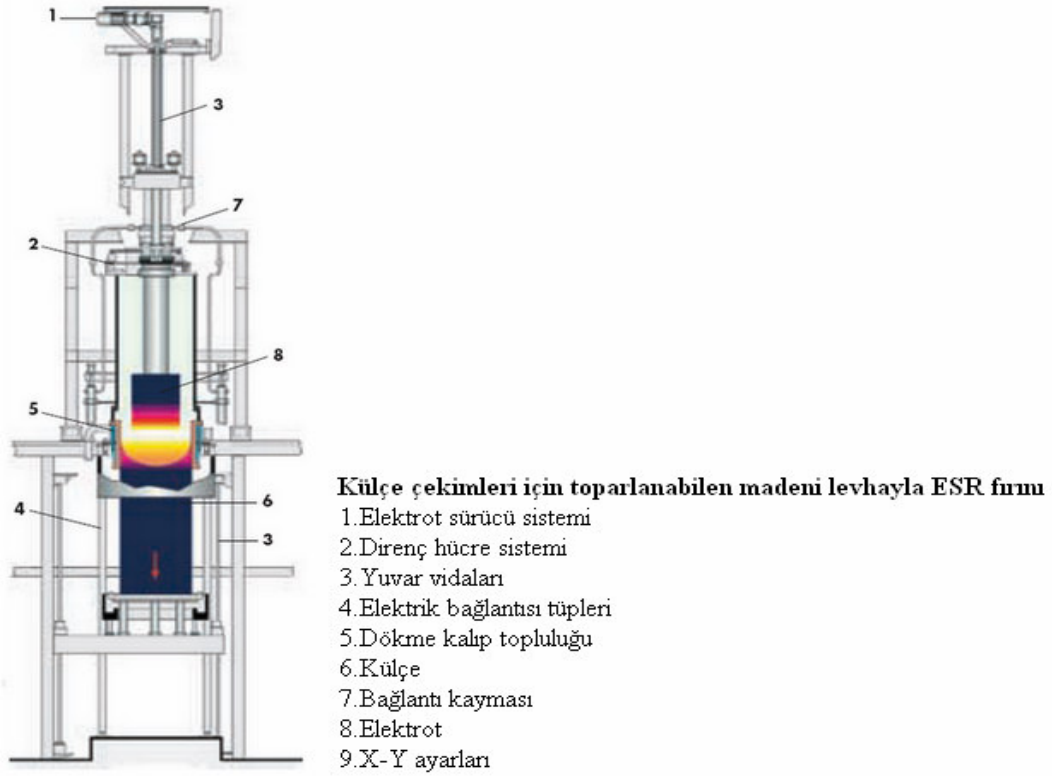
Yerinde duran ve hareket eden dökme kalıp uygulamaları. Bunlar özellikle deneyimsel ve kılavuz üretimleri ve çok yönlü yüksek ESR işlemlerinin performansını daha ucuza mal etmek için uygundur.

2.6.2 Durağan dökme kalıp sistemleri

İki karışık ergitme mevkisi ve bir mil fırın başlığı. Bunlar özellikle yüksek üretim oranlarında etkili üretimler için uygundur.

2.6.3 Külçe çekme sistemleri

Merkezi külçe çekme alanları ve elektrot değişimi yeteneği ve durağan dökme kalıp ergitmelerindeki iki harici alan mevcuttur. Merkezi alan özellikle daha geniş çapta külçeler için uygundur. Daha küçük çaptaki külçeler diğer alanlarda da ergitilebilirler. Şekil 2.8’de külçe çekimleri için toparlanabilen madeni levhayla ESR fırını şematik gösterimi yer almaktadır.



Şekil 2.8 Külçe çekimleri için toparlanabilen madeni levhayla ESR fırını
şematik gösterimi [2]

2.6.4 Atmosferik koruma sistemleri

Etkisiz gaz atmosferleri altında ergitme için kullanılan fırın kaput sistemlerindeki durağan dökme kalıp uygulamaları. Bu sistemler özellikle Ti, Al ve alaşımları ya da Al içeriğinin düşük olduğu alaşımları ergitmede önerilmektedir.

2.6.5 Hava basıncı kontrolü/vakum sistemleri

Vakum, etkisiz gaz ve artan basınç altındaki ESR işlemi için tamamıyla kesinleşen sistemler. Bu sistemler özellikle yüksek içerikli azot ve reaktif elementlerle üretilen ESR külçeleri için uygundur.

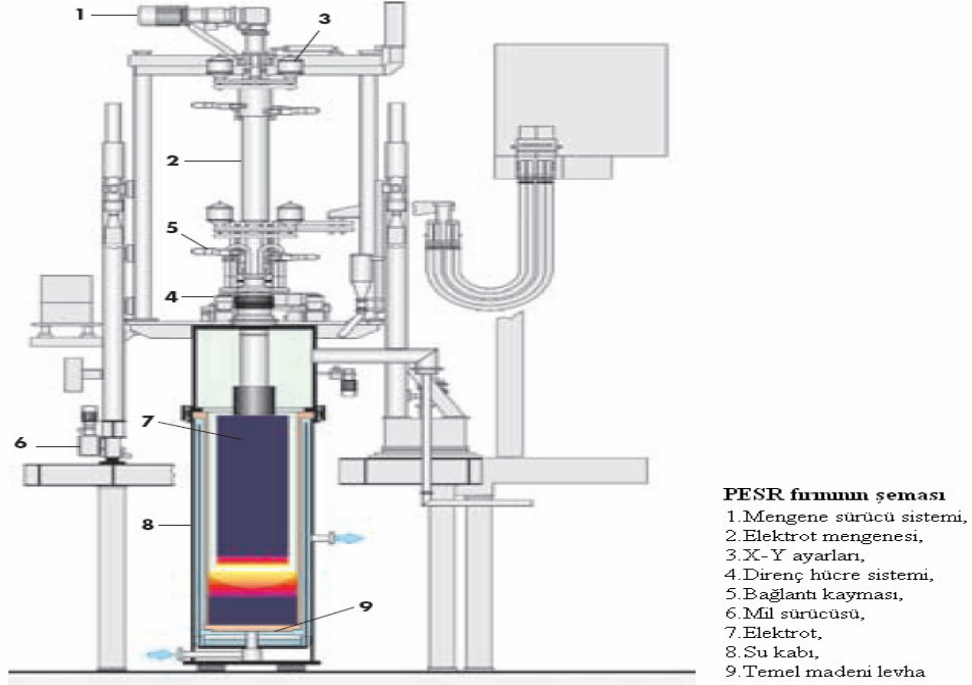
2.7 ESR Prosesinin Varyasyonları

ESR prosesinin yanı sıra 3 varyasyon daha geliştirilmiştir. Bunlar Yüksek basınç altında yeniden ergitme (PESR), etkisiz gaz atmosferinde ergitme (IESR), redükleme basıncı altında yeniden ergitme (VAC-ESR)'dir.

2.7.1 Basınç altında elektro cüruf ergitme (PESR)

Otuz yıldır çeliğin özelliklerinin artırılması için azot gibi pahalı olmayan alaşım elementleri daha önemli hale gelmiştir. Ostenitli çelikte azot özellikle de çözünemeyen türünde katı maddelerin ergimesinin gerçekleştirilmesiyle verim gücü arttırılmaktadır. Feritik çelik tabakalarıyla demir karbon alaşımının ısılandırılması ve söndürülmesiyle elde edilen mikro yapılarla karşılaştırılabilen nitrürlerin dağılımının sağlanması amaçlanmaktadır. Bu yeni materyallerin üretimi için normal basınç altındaki yüksek miktardaki azot çözünürlüğünün sıvılaşmış çelikte karşılaştırılması gerekmektedir ve böylece katılaşma süresince azot kaybının önlenmesi gerekmektedir. Basınç köklerinde orantılı olan azot çözünürlüğü sağlandığı takdirde yüksek miktarda azotu ergimeyle karşılaştırmak mümkündür ve daha yüksek basınç altında katılaşmaya müsaade edilebilir. 42 çubuğun basıncı elektro cüruf ergitme metodunda çeşitlendirilmiştir.

Ergitme süresi boyunca sıvı evresindeki metal zerrelere rağmen, azot gaz evresi yoluyla etkisiz hale getirilmektedir. Bu yüzden azot katı azot şeklinde ergitme süresi boyunca tedarik edilmelidir. Sistemdeki yüksek basınç sıvılaşan çeliğe azotun varlığını göstermektedir. Basınç seviyesi maden alaşımındaki alaşıma ve azotun içeriği de ergitilen külçeye bağlıdır. Şekil 2.9'de PESR fırının şematik gösterimi yer almaktadır.



Şekil 2.9 PESR fırının şematik gösterimi [2]

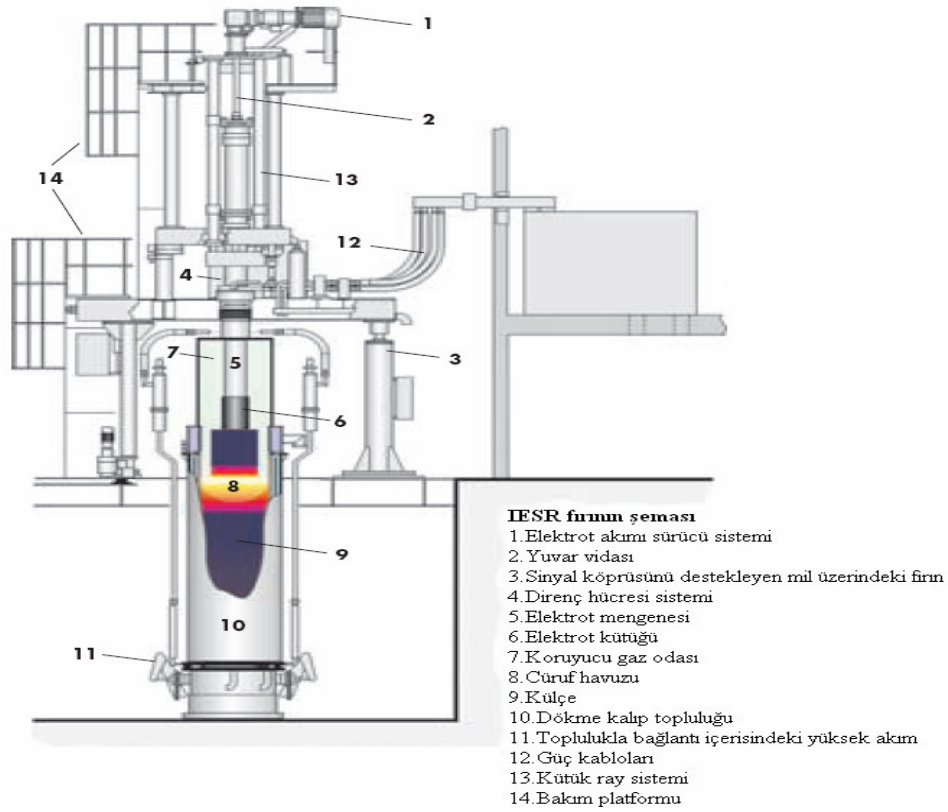
2.7.2 Etkisiz gaz atmosferinde ergitme (IESR)

PESR uygulamasındaki ALD gelişiminin bir sonucu olarak ALD günümüzde ESR metodu için atmosfer basıncında etkisiz gaz atmosferinin kullanılması gerektiğini vurgulamaktadır. Bu ESR metodunun hidrojenin ilerlemesinde karşılaşılan problemlerden ayrılmasını ve atmosferik değişimlerin etkilerinden sakınılmasını sağlamaktadır. IESR yöntemi ile aşağıda verilen sonuçlar elde edilmiştir;

- Elektrotun ve cürufun oksitlenmesi tamamiyle engellenmiştir,
- Ti, Zr, Al, Si gibi elementlerde meydana gelen oksitlenme neredeyse tamamiyle engellenmiştir. Bu analitik oranlardaki süper alaşımların Ti ve Al gibi alaşımları içeren ergimede büyük önem taşımaktadır,
- Külçenin daha temiz olması sağlanmıştır,
- Etkisiz gaz olarak argon kullanıldığında, azot ve hidrojenin geçişi önlenmiştir,(etkisiz gaz olarak azot kullanıldığında azot karıştırılması mümkündür).

Fırın atmosferinde oksijen eksikliğine rağmen, gaz evresi yoluyla kükürt artık daha fazla uygun olamamaktadır. Bununla birlikte, kükürt günümüzde çelik elektrotların yapımında metalürji tarafından dikkate alınmaktadır.

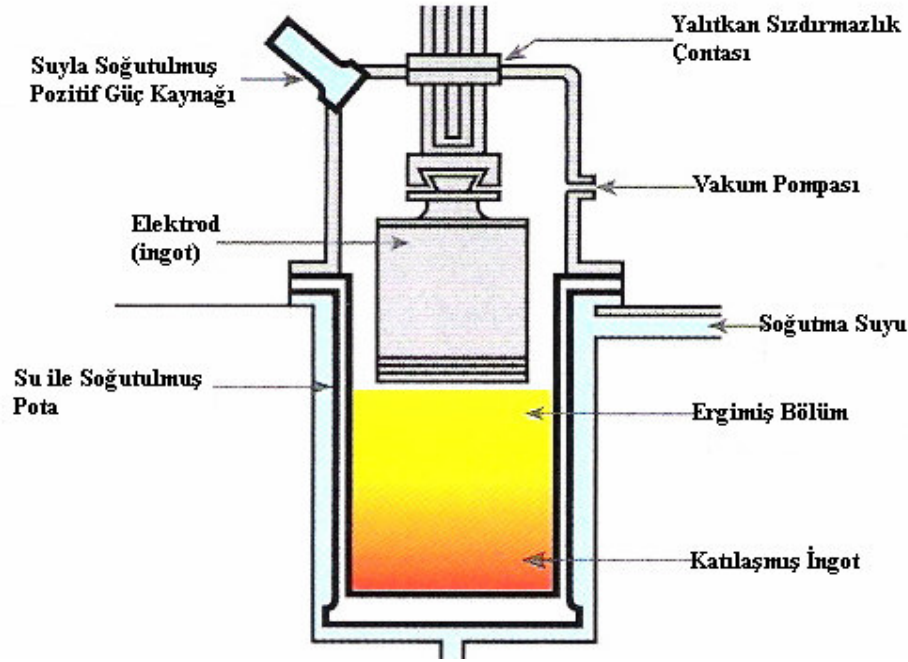
İki fırın kavramı uygundur; bunlardan biri sıkı bağ içinde olduğu koruyucu bir kaput sistemidir, diğeryse ergime metodu başlamadan önceki etkisiz gaz atmosferine karşı tamamıyla bir değişime imkan sağlayan vakum sıkılaştırılmasıyla oluşan koruyucu kaput sistemidir. Şekil 2.10'da IESR fırının şematik gösterimi yer almaktadır.



Şekil 2.10 IESR fırının şematik gösterimi [2]

2.7.3 Vakum altında elektro cüruf ergitme (VAC-ESR)

VAR ise ESR içerisinde soğutulan kalıbı cüruf havuzuna daldırılan tüketilebilir elektrotta saflaştırma işlemi için vakumlamaya ihtiyaç duyar. Elektrot ve işleme konan külçeler ve elektrot tarafından eritilen metal damlalarındaki yüksek sıcaklıktaki cüruf arasında bir elektrik akımı söz konusudur. Saflaştırılan materyalden elde edilen yeni külçe dökme kalıbın üstüne doğru meydana getirilir. Ergimedeki oksitlenme problemleri görülmemektedir. Buna ek olarak, hidrojen ve azot gibi çözünemeyen gazlar hareket ettirilebilir ve VAR süresi boyunca ortaya çıkan beyaz lekeler en aza indirgenebilir. Sonuç olarak, her ikisinin de avantajları bir metotta birleştirilmiştir. Bu titanyum erimesi ya da süper alaşımlar için önem teşkil etmektedir. Şekil 2.11’de VAC-ESR fırının şematik gösterimi yer almaktadır.



Şekil 2.11. VAC-ESR fırının şematik gösterimi [3]

2.8 ESR Yöntemiyle Üretilen Malzemelerin Kullanım Alanları

Yüksek ürün kalitesi sunan bu yöntem ile elde edilmiş malzemelerin geniş ve özel kullanım alanları mevcuttur. Bu yöntem yardımı ile aşınmaya dayanıklı, sıcaklık altında stabilize çalışabilen, kimyasal ve fiziksel olarak üstün nitelikteki malzemelerin ihtiyaç duyulduğu birçok sektörde kullanılabilirler.

Kullanım alanları aşağıdaki gibi sıralanabilir;

- Milleme kotraları, cam katmanları vb. için çelik aletler,
- Yuvar taşıyan çelikler,
- Türbin ve üreteç milleri için çelikler,
- Atmosfer ve güç türbinleri için süper alaşımlar,
- Kimya endüstrisi için nikel alaşımlar,
- Soğuk rulolar,
- Silah sanayi için top namluları,
- Değirmen öğütücüleri,
- Maden makine ve donanımları,
- Plastik-Çelik sektöründe kullanılan kalıp malzemeleri,
- Bilyeli yatak malzemeleri,
- Türbin ve jeneratör millerinde kullanılan malzemeler.

3. MODELLEME İÇİN ELEKTRO CÜRUF ERGİTME METODUNUN KONTROLÜ

İstikrarlı ve yanıtlayıcı yeniden çözülebilen cürufun kontrolü süper maden alaşımlı ürünler için kritiktir. ESR akımı kontrol sistemleri daha kıvrımlıdır, bunun yanı sıra yalnız girdiler ya da yalnız çıktılar (SISO) sistemleri ESR de belirtilen fiziksel tüm metotların genellemesinden oluşmaktadır. Temizleyici için artan talep daha da fazla projeye dönüştürülmüştür, kimyasal olarak temizlenen maden alaşımları akım kontrol tekniklerinin limitlerini zorlamaktadır. SISO akımının kontrol metotları yüksek kalitede külçeler üretme konusunda başarısızlığa uğramıştır ve ESR metodunun karışıklığından dolayı üreticilerin standart kalite artırımındaki çabalarını engellemektedir. Diğer bir popüler yeniden çözümleme tekniği vakum ark çözümlenmesidir(VAR),bu teknik iyice araştırılmış ve endüstride yararlı olabileceği

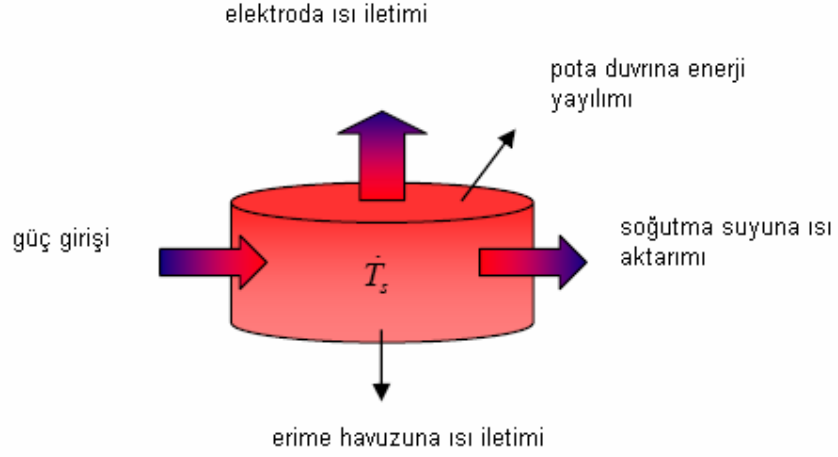
kanıtlanmış ve modellendirilmiştir. ESR ve VAR kontrol tasarımlarında ve modellemelerde benzerlikler göstermektedir (Seokyoung, 2005).

Doğru bir kontrol metodu geliştirmenin ilk basamağı ESR metodu boyunca görülen fiziksel olguları tanımlayan enerji modelidir. Örneğin, erime oranını kontrol edebilmek için ESR metodunda erime oranını nelerin etkilediğini hangi parametrelerin gerekli olduğunu belirlemek gerekir. Hedef bütün önemli metot parametrelerinin içeren ESR metodu için oluşturulan metoda enerji modeliyle yaklaşmaktır (Seokyoung, 2005).

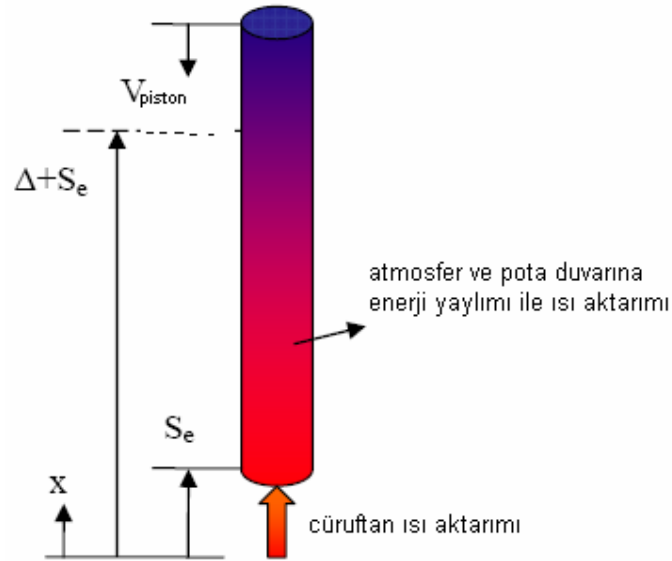
3.1 Elektro-Cüruf Tekrar Ergitme İşlemi (ESR) İçin Isı Transfer Modeli

Katılaşmakta olan faz değişimindeki geçici ısı iletimi, muazzam teknolojik önemi olan bir problem alanı sunmaktadır. Örnekleri olarak metal dökümü, buz oluşumu, uzay araçları ısı absorpsiyon (ısı çekim) gibi birkaç başlık sayılabilir. Bu tür problemler doğal olarak doğrusal değildir ve yeri genellikle önceden belirli olmayan bir hareketli sınır içermektedirler. Bu sorunlar için kesin çözümler çok zordur ve problemin basitleştirilmiş bir modeli kullanılıyor olsa bile, zorunlu olarak kayda değer sayısal hesaplama/analiz gerektirirler.

Analitik hesaplama yöntemleri bu tür sorunlara yaklaşık çözümler getirmekte faydalı olabilirler ve aynı zamanda çözüm sürecinde, fiziksel olguya dair gerçek bir kavrayış/anlayış elde edilebilir. Soyut sınırlı fark ya da sınırlı eleman yöntemleri kesin sonuçlar ile kullanılabilir fakat büyük miktarlardaki birleştirilmiş denklemler kontrol tasarımını ciddi şekilde zorlaştıracaktır. Bu bölümde, ESR işlemi için indirgenmiş düzenli modele, ESR işlemine ve batmazlık ve batırma derinliği modeli gibi ilave dinamikler için yaklaşık çözümü uygulamaya gerekli olan uygun varsayımlar hakkında bilgiler verilmektedir. Şekil 3.12 ve 3.13’ de şematik bir ısı transfer modeli gösterilmektedir.



Şekil 3.12 ESR işleminde cürufun enerji dengesi (Ahm, 2005)



Şekil 3.13 Elektrot için enerji dengesi ve koordinat ayarı (Ahm, 2005)

Eriyik cürufta üretilecek ısı, eriyik cürufun sınırlarından,

1. Cürufa batırılmış elektrot yüzeyine
2. Eriyik cüruf ve iç kalıp duvarı arasındaki katı cüruf katmanına (cüruf derisi)
3. Elektrot ve kalıp arasındaki atmosfere açık eriyik cüruf yüzeyine
4. Eriyik metal havuzunun yüzeyine geçer.

Yukarıdaki ısı transfer modeline dayanarak, ESR işlemi için indirgenmiş düzenli modeli elde etmekte aşağıdaki varsayımlarda bulunabiliriz.

1. Eriyik cüruftaki ısı dağılımı nerdeyse aynıdır. Eriyik cürufun, eriyik metal havuzunda olduğu üzere, şiddetli biçimde çalkalandığı/karıştığı gözlemlenmiştir ve birçok uzman aynı ısı dağılımı olduğunu düşünmüştür (Athans vd., 1968).
2. Eriyik cüruf ve cüruf derisi arasındaki ısı transfer katsayısı sabittir ve ne cüruf kompozisyonuna ne de eriyik cürufun ısisına bağlı değildir.
3. Eriyik cürufun etki alanı üzerindeki elektrik akımı yoğunluk dağılımı aynıdır.
4. Cüruf derisi, cürufun aynı ergime sıcaklığındadır. (T_{ss})
5. r_m potanın yarı çapı ise, cüruf derisi kalınlığı, d_s ve pota duvar kalınlığı, h_w , $d_s \ll r_m$ ile $h_w \ll r_m$ 'yi karşılar.
6. Cüruftan eriyik havuzuna doğrudan ısı transferi yoktur.
7. Yalnızca cüruf yüzeyi ve pota arasında yayılma (ısı/enerji) gerçekleşir
8. C bir sabit değer ve K_r elektrotun oda ısisındaki iletkenliği ise, cüruf K_e 'deki elektrot iletkenliği $K_e = K_r e^{-c/T}$ ile tanımlanır.
9. Cüruf derisine dengede duruyormuşçasına muamele yapılabilir.
10. Elektrot yüzü işlem boyunca düzdür.
11. Cüruf hacmi çok yavaş şekilde değişir.

3.2 Cürufun Isı Transfer Modeli

ESR işleminde cüruftaki ısı, elektrota iletim ve potada dolaşan soğutucuya aktarım yolu ile dağıtılır. Yayılım ile dağıtılan enerji miktarları, iletim ve aktarım ile yapılan enerji dağıtımına kıyaslandığında, göreceli olarak düşüktür (Athans, 2000). Sistemde depolanan enerji, sisteme giren ve sistemden çıkan enerji arasındaki farktır. Sisteme giren enerji, direnç yolu ile ısıtılan cüruf üzerinden geçirilen akımdan üretilen güçtür. Cüruf katmanı, ESR fırınlarındaki en yüksek dirençli elemandır ve elektrik enerjisinin ısı enerjisine dönüşümünden sorumludur (Duckworth ve Hoyle, 1969).

ESR işlemindeki enerji dengesi Şekil 3.1 ve Şekil 3.12' de resmedilmiştir. Cüruftaki dirençli ısınma ile elde edilen ısının bir kısmı cürufta depolanır, bir kısmı potadaki soğutma suyuna aktarım ile dağıtılır ve kalanı da elektroda iletilir. Cüruf ve havuz arasındaki ısı transferi,

soğutma suyuna olan iletim kayıpları ve elektroda iletimdeki kayıp ile kıyaslandığında küçüktür (Ohmura vd., 1983). Bu yüzden modelde, cüruf ve erime havuzu arasındaki ısı transferi göz ardı edilmiştir. Bakır pota duvarlarının yüksek termal iletkenliği sebebi ile potanın kendi termal direnci göz ardı edilebilir (Ohmura vd., 1983). Cüruf için güç giriş ve çıkışının kısaca enerji ilişkisi Denklem 3.1 ve Denklem 3.2'deki gibi tanımlanır. Cürufta saklanan enerji ise Denklem 3.3'de yer almaktadır.

$$P_{\text{çıkış}} = P_{\text{elektrota iletim}} + P_{\text{soğutma suyuna aktarım}} + P_{\text{yayılım}} \quad (3.1)$$

$$P_{out} = H_e A_e (T_s - T_m) + H_s 2\pi r_m h_s (T_s - T_{ss}) + \sigma \varepsilon (2\pi r_m^2 - 2\pi r_e^2) (T_s^4 - T_\infty^4) \quad (3.2)$$

ise;

H_e :elektrotun eşit termal katsayısı (W/cm²K)

A_e :elektrotun enine kesitinin alanı (cm²)

T_s :cürufun sıcaklığı (K)

T_{ss} :cürufun ergime sıcaklığı (K)

T_m :elektrotun erime sıcaklığı (K)

H_s :cürufun eşit termal katsayısı (W/cm²K)

r_e :elektrotun yarıçapı (cm)

r_m :potanın yarıçapı (cm)

h_s :cürufun yüksekliği (cm)

σ :Stefan-Boltzman sabit değeri (W/m²K⁴)

ε :cürufun salım gücü

T_∞ :oda sıcaklığı (K)

Cürufta saklanan enerji;

$$P_{\text{saklanan}} = \rho_s V_s C_s \dot{T}_s \quad (3.3)$$

ρ_s :cürufun yoğunluğu (g/cm³)

V_s :cürufun hacmi (cm³)

C_s :cürufun spesifik ısısı (J/gK)

Eriyik cüruf içerisinde tam bir konvektif karışma olduğunu varsaymaktayız, bu yüzden, cüruf içerisindeki sıvı hareketi, elektromanyetik ve ısı değişimleri dikkate alınmaz. Dolayısıyla, cüruf sıcaklığının tamamen aynı olduğu var sayılır. Denklem (3.4), durum değişkenleri bakımından ısı transferini tanımlayan durum denklemidir ve P in AC' dir ve cüruftaki elektrik enerjisi, 2000 – 5000 amper, 10 – 50 V aralığında değişkenlik gösterir.

$$\dot{T}_s = \frac{1}{\rho_s v_s C_s} \left[\frac{P_{in} - H_e A_e (T_s - T_m) - H_s 2\pi r_m h_s (T_s - T_{ss})}{-\sigma \epsilon (2\pi r_m^2 - 2\pi r_e^2) (T_s^4 - T_\infty^4)} \right] \quad (3.4)$$

3.3 Elektrotun Ergime Dinamiklerinin Modellenmesi

3.3.1 Elektrotun termal enerji modeli

ESR işlemindeki elektrot ergime dinamiklerinin modellenmesi, VAR işlemindeki elektrot ergime dinamikleri ile birçok ortak yanı paylaşmaktadır. ESR elektrot ergime dinamikleri, VAR işlemindekine benzer, bir hareketli sınır Stefan problemi olarak tanımlanabilir (Bertram ve Zanner, 1986). İşlemlerdeki bu benzerlikler sebebi ile VAR işlemi için kullanılan modelleme yaklaşımı fazla değişiklik gerektirmeden kullanılabilir. Elektrot ergime dinamikleri modellenmesi, öncelikli olarak Beaman' ın VAR işleminin indirgenmiş düzenli modellenmesine dayanmaktadır (Beaman vd, 2001). Elektrotun yarı sonsuz bir plaka olduğu varsayılarak, elektrot modelinin ısı transferinin simülasyonu için tek boyutlu, geçici ve doğrusal olmayan bir ısı akış modeli kullanılmaktadır. Cürufa batırılmış olan elektrot ucunun başlangıçta ergime sıcaklığında olduğunu ve işlem boyunca uç kısmın aynı/üniform olduğunu varsayalım (düz elektrot varsayımı). Sistem tek boyutlu bir Fourier denklemi olarak modellenebilir. Denklem 3.5 de Fourier denklemi yer almaktadır.

$$\rho_e(T) C_e(T) \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K_e(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right) \quad (3.5)$$

ise;

ρ_e :elektrot malzemesinin yoğunluğu (g/cm³)

C_e :elektrot malzemesinin spesifik ısısı (J/gK)

K_e :elektrot malzemesinin termal iletkenliği (W/cmK)

Diferansiyel denklemler için sınır durumları aşağıdaki gibidir:

$$T(S_e, t) = T_m \quad (3.7)$$

$$T(\infty, t) = T_r \quad (3.8)$$

$$\frac{\partial T}{\partial x}(\infty, t) = 0 \quad (3.9)$$

Ergime kuvveti Denklem 3.8 de ki gibi açıklanabilir.

$$P_m(I, d) + K_e A_e \frac{\partial T}{\partial x} = \rho_{sup} L^* A_e \dot{S}_e \quad (3.9)$$

ise;

S_e :faz değişiminin meydana geldiği erime çizgisi/cephesi (cm)

T_m :elektrotun ergime sıcaklığı (K)

T_r :oda sıcaklığı (K)

P_m : ergime kuvveti (elektrota P iletim) (W)

I :giriş akımı (A)

D :batırma derinliği (cm)

P_{sup} :aşırı ısınma sıcaklığında elektrotun yoğunluğu (g/cm³)

L^* : $L^* = h_{sup} - h_m$, elektrotun faz değişim sıcaklığı (J/g)

h_{sup} :elektrotun aşırı ısınma spesifik entalpisi (J/cm³)

h_m :elektrotun ergime sıcaklığı spesifik entalpisi (J/cm³)

Bu tek boyutlu, geçici ve doğrusal olmayan ergime problemini çözmek için, sayısal yöntemler (sonlu eleman yöntemleri, sonlu fark yöntemleri, vs..) yada tahmini/yaklaşık integral yöntemleri kullanılabilir. Çok sayıdaki birleşik denklemler sebebi ile sayısal yöntemleri kontrol dizaynlarında kullanmak zordur, bu yüzden yaklaşık integral yöntem, kontrol dizaynı için uygun bir model türetmede daha iyi bir çözüm tekniği olacaktır (Beaman vd, 2001).

Hareketli sınırlı Stefan problemleri, kaynak, absorpsiyon (ısı çekim), ve ergime gibi uygulamalarda çok önemlidir. Sayısal yaklaşımlar üretilmeden önce, yaklaşık integral yöntemleri çok fazla kullanılmaktaydılar. ESR eritme işlemine çok benzeyen istisnai bir problem, uzay gemilerinin ısı kalkanlarının absorpsiyonudur. Bu problemde, tekrar girişteki

hava sürtünmesi ısınması, ısı kalkanlarının ablasyonuna/ayrılmasına sebep olmaktadır ki bu da kalkan yüzeyinde hareketli bir sınır durumu vermektedir (Beaman vd, 2001).

Sınır katman tahminleri ve tahmini integral yöntemlerin kullanımından sonra, ergime problemi için durum denklemleri Denklem 3.10,Denklem 3.11 şeklinde açıklanabilir.

$$\dot{\Delta} = \frac{\alpha_r C_{\Delta\Delta}}{\Delta} - \frac{C_{\Delta p}}{h_m} p_m \quad (3.10)$$

$$\dot{S}_e = \frac{\alpha_r C_{s\Delta}}{\Delta} + \frac{C_{sp}}{h_m} p_m \quad (3.11)$$

Δ sınır tabakası kalınlığı (cm), S_e faz değişiminin meydana geldiği ergime çizgisi/cephesi (cm), α_r oda ısı termal difüzyon katsayısı (cm^2/s), h_m ergime sıcaklığında hacme spesifik entalpidir ve boyutsuz sabit değerler malzemeye özgü olup Denklem 3.12,Denklem 3.13,Denklem 3.14 ve Denklem 3.15'deki gibi türetilirler:

$$C_{\Delta\Delta} = \frac{224(\Lambda^* + 1)}{3\Lambda^* + 11} \left(\frac{1}{2} + \frac{\beta h_m}{3} \right) \quad (3.12)$$

$$C_{\Delta p} = \frac{32\Lambda^*}{3\Lambda^* + 11} \quad (3.13)$$

$$C_{s\Delta} = \frac{56\Lambda^*}{3\Lambda^* + 11} \left(\frac{1}{2} + \frac{\beta h_m}{3} \right) \quad (3.14)$$

$$C_{sp} = \frac{11\Lambda^*}{3\Lambda^* + 11} \quad (3.15)$$

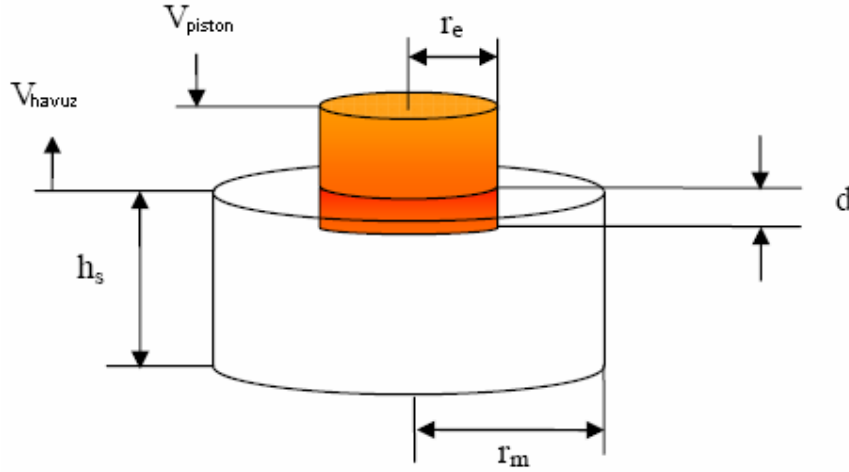
Denklem 3.12,Denklem 3.13,Denklem 3.14 ve Denklem 3.15'de yer alan Λ^* Stefan sayısı Denklem 3.16, β termal yayılma gücü parametresi Denklem 3.17'de yer almaktadır. P_m ise ergime akışı gücü (W/cm^2)dür.

$$\Lambda^* = \frac{h_m}{h_{\text{sup}} - h_m} \quad (3.16)$$

$$\beta = \frac{\alpha_m - \alpha_r}{\alpha_r} \quad (3.17)$$

3.3.2 Batmazlık ve batırma derinliği modeli

Batırma derinliği, Şekil 3.14' de gösterildiği üzere, elektrotun cüruf içerisine çıkıntı yaptığı mesafedir.



Şekil 3.14 ESR işleminin batmazlık ve batırma derinliği modelinin tanımı (Ahm, 2005)

Cürufun herhangi bir andaki hacmi Denklem 3.18'de yer almaktadır. A_s cüruf yada külçe kalınlığı, h_s cüruf yüksekliği ve d batırma derinliği ise, cürufun herhangi bir andaki hacmi V_s ' dir.

$$V_s = A_s h_s - A_e d \quad (3.18)$$

Cürufun hacmi çok yavaş değişir bu yüzden cürufun hacminin görece olarak sabit olduğu var sayılır ve dolayısıyla cüruf yüksekliğinin değişim hızı geometrik olarak batırma derinliğinin zaman türevi ile ilişkilendirilir. Burada elektrotun ucunun düz olduğu varsayımında bulunmaktayız. Denklem 3.19'da varsayımın matematiksel ifadesi bulunmaktadır(Ahm, 2005).

$$\dot{h}_s \approx \frac{A_e}{A_s} \dot{d} \quad (3.19)$$

Ergime havuzu hızı, yanma oranının doğrudan havuz hızı V_{havuz} (cm/s) ile orantılı oluşu ile tanımlanabilir. Havuz hacmi Denklem 3.20'deki gibidir.

$$V_{havuz} = \frac{A_e}{A_s} \dot{S}_e \quad (3.20)$$

Ergime hızı ise Denklem 3.21' de yer almaktadır.

$$\dot{m}_e = \rho_e A_e \dot{S}_e \quad (3.21)$$

Yukarıdaki ilişkiyi kullanılarak Denklem 3.22 elde edilmiştir. Batırma derinliği, yanma oranının ve piston hızının fonksiyonu olarak tanımlanabilir.

$$\dot{h}_s - \dot{d} = \dot{S}_e - V_{piston} - V_{havuz} \quad (3.22)$$

Batırma derinliğinin hızını veren ifade Denklem 3.23'deki gibidir.

$$\dot{d} = -\dot{S}_e + \frac{1}{a} V_{piston} \quad (3.23)$$

a geometri dolum oranı faktörü Denklem 3.24'de görülmektedir.

$$a = 1 - \frac{A_e}{A_s} \quad (3.24)$$

4. MODELLEME VE SİMÜLASYON

Cürufaltı ingotunda sıcaklık dağılımı, geçici rejimde ısı akım diferansiyel denkleminin çözümü ile bulunur. Bu denklem silindirik koordinatlarda aşağıdaki şekilde yazılır.

$$\rho_i C_i \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k_{i_x} \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(k_{i_\theta} \frac{\partial T}{\partial \theta} \right) + \left(\frac{1}{r} \right) \frac{\partial}{\partial r} \left(k_{i_r} \frac{\partial T}{\partial r} \right) + W_i \quad (4.25)$$

T=sıcaklık,

t = zaman,

C = özgül ısı,

ρ = özgül ağırlık,

k = ısı iletim katsayısı,

r = radyal eksen,

θ = açısal eksen,

x = düşey eksen,

W = ısı üretimi,

i= sıvı, katı veya sıvı+katı fazı belirtir.

Her proses için geçerli olan bu ısı akım denkleminin cürufaltı ingotu için çözümü, cürufaltı eritme yönteminin özgün varsayımlarını, sınır ve başlangıç koşullarını denklemlerle beraber düşünmekle gerçekleştirilmektedir. Modelin geliştirilmesinde, öngörülmesi amaçlanan sıvı metal profilinin eritme hızına ve malzemenin sıcaklıkla değişen termo-fiziksel özelliklerine bağlı olduğu kabul edilmektedir.

Buna ilaveten aşağıda açıklanan bazı basitleştirmelerde yapılmaktadır;

a) Katılaşma sırasında açığa çıkan gizli ısı, sıvılaşma ve katılaşma sıcaklığı arasında ki özgül ısıda düzenleme yaparak hesaba katılmaktadır.

$$C_p (\text{eş değer}) = C_p (\text{metal}) + \frac{L_H (\text{gizli.ısı})}{T_{\text{sıvı}} - T_{\text{katı}}} \quad (4.26)$$

b) İngotta açılmal simetri vardır;

$$\partial T / \partial \theta = 0 \quad (4.27)$$

c) Malzemenin ısı iletkenlik katsayısı aynı fazda veya sıcaklık aralıklarında kalmak kaydıyla düşey ve radyal yönde sabit ve eşittir:

$$\partial k_i / \partial x = \partial k_i / \partial r = 0 \quad (4.28)$$

$$k_{ix} = k_{ir} \quad (4.29)$$

d) İngotun elektrik direncinin az olmasında dolayı ingotta önemli ölçüde joule ısı oluşmaz. Bu nedenle $I^2 R = 0$ kabulü ile ısınmanın etkisi dikkate alınmamaktadır. (İngot direncinin ihmalı ve birinci varsayımda ki düzenleme ile diferansiyel denklemde ki W terimi sıfırlanmaktadır.)

e) Elektrik direncinden dolayı cürufat işlem boyunca ısı oluşur ve bu ısının bir kısmı cüruf-metal arayüzeyinden ingota akmaktadır. Kuvvetli elektromanyetik çalkalanma ve konveksiyonun cüruftaki sıcaklığı homojenleştirdiği gözlenmektedir. Dolayısıyla sabit ingot tepe sıcaklığı kabul edilmesinde bir sakınca yoktur.

$$T = T_1 \quad 0 \leq r \leq R \quad x = X \quad t > 0 \quad (4.30)$$

f) İngot ısısı yan yüzeylerden su soğutmalı bakır kalıba geçer. Eritme sırasında ingot çevresinde oluşan cüruf tabakası ve hava aralığı ısı transferine başlıca engeli teşkil eder. Bu ısı transfer katsayısı sıcaklığa bağlı olarak değişir.

$$-k \frac{\partial T}{\partial r} = h(T)(T - T_c), \quad r = R, 0 < x \leq X, t > 0 \quad (4.31)$$

T_{ζ} = çevre sıcaklığı

$h(T)$: İngottan çevreye ısı transfer katsayısı

g) Aynı şekilde ingot tabanından da bakır kalıba ısı akımı vardır.

$$-k \frac{\partial T}{\partial x} = h(T)(T - T_{\zeta}), \quad 0 < r < R, x = 0, t > 0 \quad (4.32)$$

h) Düşey eksene göre simetri kabul edilmiştir. Bundan dolayı ingot ekseninde ısı akımı olmaz, eksen hattı adyabatiktir.

$$-k \frac{\partial T}{\partial r} = 0 \quad 0 \leq x \leq X, \quad r = 0, \quad t = 0 \quad (4.33)$$

i) Problem rejim halinde olmayan ısı transfer sorunudur. Bu nedenle cürufaltı eritme olayı başlarken, başlatma takozu olarak kullanılan parçada sıcaklık alanı tanımlanmalıdır.

$$T = T_0(r, x), \quad 0 \leq r \leq R, \quad 0 \leq x \leq X, \quad t = 0 \quad (4.34)$$

Özet olarak sorun iki boyutlu, rejim halinde olmayan kısmı diferansiyel denklemin belirtilen sınır koşullarına uyacak şekilde çözümüdür (Başaran, 1982).

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{k_i}{\rho_i C_i} \left[\frac{\partial^2 T}{\partial X^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} \right] \quad (4.35)$$

$$\text{i-} \quad T = T_0(r, x) \quad 0 \leq r \leq R \quad 0 \leq x \leq X \quad t = 0$$

$$\text{ii-} \quad T = T_1 \quad 0 \leq r \leq R \quad x = X \quad t > 0$$

$$\text{iii-} \quad -k_i \frac{\partial T}{\partial r} = h(T)(T - T_{\zeta}), \quad r = R < x \leq X, t > 0$$

$$\text{iv-} \quad -k_i \frac{\partial T}{\partial x} = h(T)(T - T_f), \quad 0 < r < R, \quad x = 0, \quad t > 0$$

$$\text{v-} \quad -k_i \frac{\partial T}{\partial r} = 0, \quad r=0, \quad 0 \leq x \leq X, \quad t > 0$$

Yapılan matematiksel modelleme ışığında programlama gerçekleştirilmiştir. Hazırlanan modelleme programının kodları ekler bölümünde verilmiştir. Yapılan simülasyon doğrultusunda ingot boyutunun sıcaklık değişimi elde edilerek sonuçlar Çizelge.4.5’ de verilmiştir. Program kullanıcının girdiği verileri işleyerek sonuçları ekrana getirmektedir. Kullanıcıya deney ve ortam şartlarının değerlerini girme imkanı vermesi sayesinde farklı malzemeler ve deney koşulları için sonuçlar alınabilmektedir.

Sonuçlar göz önüne alındığında ısıнын ingot yüzeyinde ve eksenindeki dağılım rahatlıkla görülebilmektedir. Sıvı, peltemsi ve katı bölgeler renklendirme yapılarak çizelgede gösterilmektedir. Kırmızı ile gösterilen bölge eriyik ingotun cürufıla temas halinde olduğu bölgedir. Turuncu ile gösterilen bölge peltemsi bölgedir. Eflatun ile gösterilen bölge katılaşma izotermının bir göstergesi olarak ortaya çıkmıştır. Açık mavi ile gösterilen bölge ingotun katılaşmış kısmını temsil etmektedir. Cüruf altı ergitme yöntemiyle dökülen ingotun yüzey ve eksen sıcaklık dağılım grafikleri Şekil. 4.15 ve Şekil. 4.16.’ de verilmiştir.

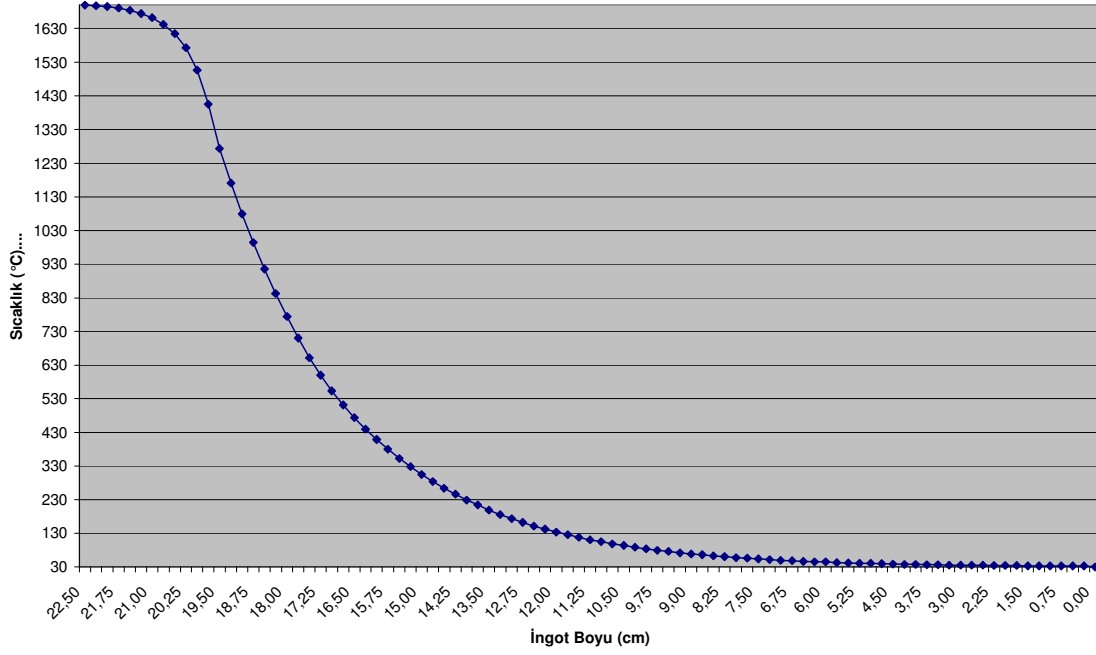
Çizelge.4.5. İngot Boyuna Göre Sıcaklık Dağılımı

$X< >$ CM	SICAKLIK<DER.C>												$X< >$ CM
22,50	1700	1700	1700	1700	1700	1700	1700	1700	1700	1700	1700	1700	22,50
22,25	1698	1698	1698	1697	1696	1693	1689	1681	1665	1631	1557	1309	22,25
22,00	1696	1695	1694	1693	1690	1684	1676	1660	1633	1584	1497	1250	22,00
21,75	1691	1691	1689	1686	1681	1672	1658	1635	1599	1546	1473	1387	21,75
21,50	1685	1684	1681	1676	1668	1655	1636	1606	1562	1501	1422	1330	21,50
21,25	1675	1674	1670	1663	1652	1634	1608	1571	1571	1445	1356	1271	21,25
21,00	1662	1660	1655	1645	1629	1606	1573	1525	1459	1373	1290	1210	21,00
20,75	1643	1640	1633	1620	1599	1569	1525	1464	1381	1301	1224	1149	20,75
20,50	1615	1611	1601	1584	1556	1517	1459	1380	1304	1231	1159	1089	20,50
20,25	1573	1568	1554	1531	1491	1442	1368	1297	1229	1162	1095	1029	20,25
20,00	1507	1497	1480	1449	1390	1335	1276	1216	1155	1093	1031	969	20,00
19,75	1405	1378	1356	1327	1285	1242	1191	1138	1083	1026	969	911	19,75
19,50	1274	1265	1251	1226	1191	1153	1109	1062	1012	960	907	853	19,50
19,25	1171	1165	1154	1132	1101	1070	1031	989	944	896	847	797	19,25
19,00	1079	1075	1064	1046	1021	991	957	919	878	834	788	741	19,00

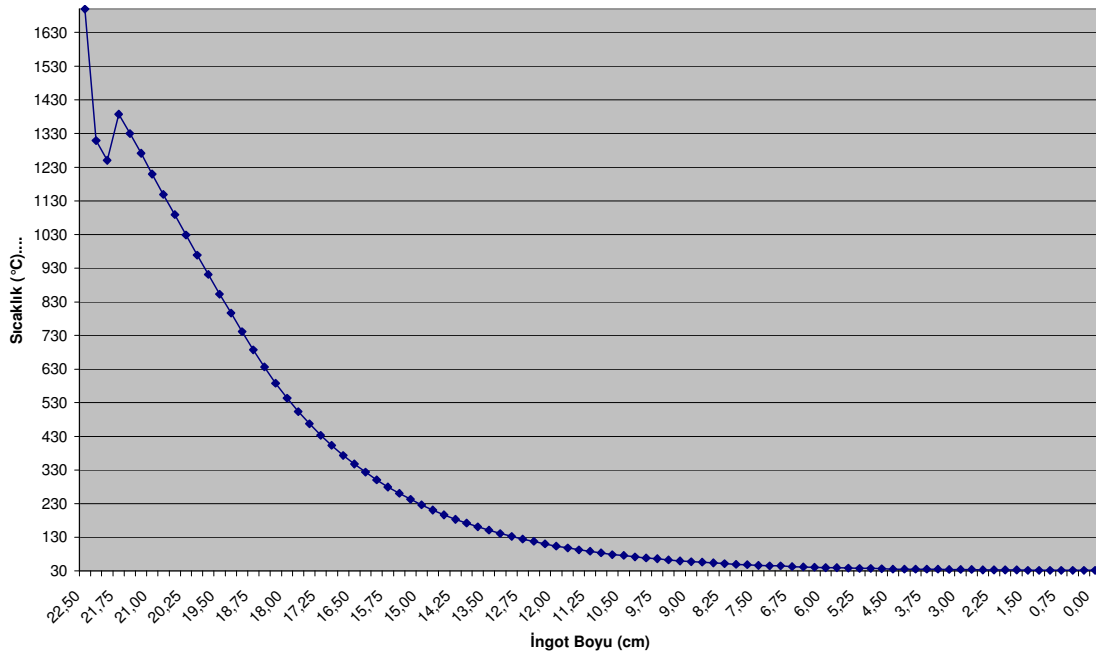
$X < l >$ CM	SICAKLIK<DER.C>												$X < l >$ CM
18,75	994	991	982	965	944	917	886	851	814	773	730	687	18,75
18,50	916	913	905	890	871	847	819	787	752	715	676	636	18,50
18,25	843	840	833	820	802	780	755	725	694	660	625	588	18,25
18,00	774	772	765	754	738	718	694	668	640	610	578	544	18,00
17,75	710	708	702	692	678	660	640	617	591	564	535	504	17,75
17,50	652	650	645	636	624	600	590	570	547	522	495	467	17,50
17,25	600	598	594	586	575	561	545	527	506	484	459	433	17,25
17,00	554	552	548	541	531	519	505	488	469	449	427	403	17,00
16,75	512	510	507	500	492	481	468	453	436	417	396	374	16,75
16,50	474	473	469	464	456	446	434	420	405	387	368	348	16,50
16,25	440	439	436	431	423	414	403	391	376	360	342	324	16,25
16,00	409	408	405	400	393	385	375	363	350	335	319	301	16,00
15,75	380	379	376	372	366	358	348	337	325	311	296	280	15,75
15,50	353	352	350	345	340	333	324	314	302	290	276	261	15,50
15,25	328	327	325	321	316	309	301	292	281	270	257	243	15,25
15,00	305	304	302	299	294	288	280	272	262	251	239	227	15,00
14,75	284	283	281	278	273	268	261	253	244	234	223	211	14,75
14,50	264	263	262	259	255	249	243	236	227	218	208	197	14,50
14,25	246	245	244	241	237	232	227	220	212	204	194	184	14,25
14,00	229	229	227	225	221	217	211	205	198	190	182	172	14,00
13,75	214	213	212	209	206	202	197	191	185	178	170	161	13,75
13,50	199	199	198	196	193	189	184	179	173	166	159	151	13,50
13,25	186	186	185	183	180	176	172	167	162	156	149	142	13,25
13,00	174	174	173	171	168	165	161	157	151	146	140	133	13,00
12,75	163	162	161	160	157	154	151	147	142	137	131	125	12,75
12,50	152	152	151	150	147	145	141	138	133	128	123	118	12,50
12,25	143	143	142	140	138	136	133	129	125	121	116	111	12,25
12,00	134	134	133	132	130	127	125	121	118	114	109	104	12,00
11,75	126	126	125	124	122	120	117	114	111	107	103	99	11,75
11,50	118	118	117	116	115	113	110	108	105	101	97	93	11,50
11,25	111	111	111	110	108	106	104	102	99	96	92	88	11,25
11,00	105	105	104	103	102	100	98	96	93	90	87	84	11,00
10,75	99	99	98	98	96	95	93	91	88	86	83	79	10,75
10,50	94	94	93	92	91	90	88	86	84	81	79	76	10,50
10,25	89	89	88	87	86	85	83	82	80	77	75	72	10,25
10,00	84	84	84	83	82	81	79	78	76	74	71	69	10,00
9,75	80	80	79	79	78	77	75	74	72	70	68	66	9,75
9,50	76	76	76	75	74	73	72	70	69	67	65	63	9,50
9,25	72	72	72	71	71	70	69	67	66	64	62	60	9,25
9,00	69	69	69	68	67	67	66	64	63	61	60	58	9,00
8,75	66	66	66	65	65	64	63	62	60	59	57	56	8,75
8,50	63	63	63	62	62	61	60	59	58	57	55	54	8,50
8,25	61	60	60	60	59	59	58	57	56	55	53	52	8,25
8,00	58	58	58	58	57	56	56	55	54	53	51	50	8,00
7,75	56	56	56	55	55	54	54	53	52	51	50	49	7,75
7,50	54	54	54	53	53	52	52	51	50	49	48	47	7,50
7,25	52	52	52	52	51	51	50	49	49	48	47	46	7,25
7,00	50	50	50	50	49	49	48	48	47	46	45	45	7,00
6,75	49	49	49	48	48	48	47	46	46	45	44	43	6,75
6,50	47	47	47	47	47	46	46	45	45	44	43	42	6,50
6,25	46	46	46	46	45	45	44	44	43	43	42	41	6,25

X<l> CM	SICAKLIK<DER.C>												X<l> CM
6,00	45	45	44	44	44	44	43	43	42	42	41	40	6,00
5,75	43	43	43	43	43	43	42	42	41	41	40	40	5,75
5,50	42	42	42	42	42	42	41	41	40	40	39	39	5,50
5,25	41	41	41	41	41	41	40	40	40	39	39	38	5,25
5,00	41	41	40	40	40	40	40	39	39	39	38	38	5,00
4,75	40	40	40	40	39	39	39	39	38	38	37	37	4,75
4,50	39	39	39	39	39	38	38	38	38	37	37	36	4,50
4,25	38	38	38	38	38	38	38	37	37	37	36	36	4,25
4,00	38	38	38	37	37	37	37	37	36	36	36	35	4,00
3,75	37	37	37	37	37	37	36	36	36	36	35	35	3,75
3,50	37	36	36	36	36	36	36	36	35	35	35	35	3,50
3,25	36	36	36	36	36	36	35	35	35	35	35	34	3,25
3,00	36	36	35	35	35	35	35	35	35	34	34	34	3,00
2,75	35	35	35	35	35	35	35	34	34	34	34	34	2,75
2,50	35	35	35	35	35	34	34	34	34	34	34	33	2,50
2,25	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	33	33	2,25
2,00	34	34	34	34	34	34	34	34	33	33	33	33	2,00
1,75	34	34	34	34	34	34	33	33	33	33	33	33	1,75
1,50	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	32	1,50
1,25	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	32	32	1,25
1,00	33	33	33	33	33	33	33	33	33	32	32	32	1,00
0,75	33	33	33	33	33	33	33	32	32	32	32	32	0,75
0,50	33	33	33	33	32	32	32	32	32	32	32	32	0,50
0,25	33	32	32	32	32	32	32	32	32	32	32	32	0,25
0,00	30	32	32	32	32	32	32	32	32	32	32	32	0,00

Çizelge 4.5 kullanılarak Şekil.4.15 ve 4.16 oluşturulmuştur. Şekil.4.15’ de ingot eksenindeki sıcaklık-boyut değişimi görülmektedir. Şekil 4.16’ da ise ingot yüzeyindeki sıcaklık-boyut değişim grafiği veriler yardımıyla çizilmiştir.



Şekil.4.15 İngot Eksensindeki Sıcaklık Değişimi (Sıcaklık °C, ingot-boyu cm)



Şekil.4.16 İngot Yüzeyindeki Sıcaklık Değişimi (Sıcaklık °C, ingot-boyu cm)

5. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Yapılan çalışmada ingotun matematik ve fiziksel modellerinden yararlanılarak ingot için sıcaklık dağılımını veren program yazılmıştır. Yazılan program ingot boyutunun değişimine karşılık ortaya çıkan sıcaklık dağılımını değerlendirilmek üzere ortaya koymaktadır. Prosesin tamamının modellenenebilmesi için prosesin öğeleri olan elektrod, cüruf ve ingotun matematiksel modellerinden yararlanılarak ayrı ayrı programlanması gerekmektedir. Prosesin tamamının modellenmesi sonuçların daha iyi yorumlanmasını sağlamakla birlikte tam bir öngörü niteliği taşıyacaktır. Ayrıca bu program her ne kadar cüruf altı ingottaki sıcaklık dağılımı için yazılmış olsada sınır koşullarında gerekli değişiklikler yapılarak ingot dökümü, plazma ark, vakum ark içinde kullanılabilir. Ayrıca sürekli döküme kolaylıkla adapte edilebilir.

KAYNAKLAR

- Ahm Seokyoung, "Modeling, Estimation and Control of Electro Slag Remelting Process" Doctorate thesis, The University of Texas at Austin, 2005
- Athans, M., Wishner, R. P., and Bertolini, A. "Suboptimal State Estimation for Continuous-Time Nonlinear Systems from Discrete Noisy Measurement," IEEE Transactions on Automatic Control, Cilt AC-13, No. 5, 1968, S. 504-514.
- Beaman J. J., Williamson R. L., and Melgaard D. K. "A Nonlinear Reduced Order Model for Dynamic VAR Melt Rate Control," Proceedings of the International Symposium on Liquid Metal Processing and Casting, Santa Fe, New Mexico, 2001, S. 161-174.
- Bertram L. A. and Zanner F. J. "Electrode Tip Melting Simulation during Vacuum Arc Remelting of Inconel 718," Modeling and Control of Casting and Welding Processes, ed. TMS, Warrendale, PA, 1986, S.95-106.
- Chiho Wei, Shunhua Xiang, "Electrical Conductivity of Molten Slags of $\text{CaF}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$ and $\text{CaF}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CaO}$ Systems for ESR" Isij International, Cilt. 33, 1993 S.239-244
- Dr. Bachner E., Dr. Jager H., "The Advantages of electro slag remelting" Steel Technology International, London, 1988, S.187-190
- Duckworth W. E. and Hoyle G. Electros slag Refining, Chapman and Hall Ltd., London, 1969.
- Hasabi F., "Handbook of Extractive Metallurgy", Wiley-Vch, 1997, Cilt. 1, S.1-403
- Kharicha A. , Ludwig A. , Wu M." Shape and stability of the slag/melt interface in a small dc ESR process" Materials Science and Engineering, 2005 S.1
- L. Mete ÜNAL,"Çelik Üretiminde İnküzyon ve Azaltılması" Rota Yayın Yapım, İstanbul, 2001,S.9.
- M.K.E., "Elektro Cüruf Arıtma Talimatı", Fabrika talimat notları, Kırıkkale, 1985
- Meredith J., Buckentin R., "Melt Decomantamination of Radioactive Stainless Steel by Electros slag Remelting", M.S., Mineral Processing Engineering, Montana College of Mineral Science and Technology, 1983 S. 16
- Mohandesi J. Aghazadeh, Shahosseini M.H." Transformation Characteristics of Functionally Graded Steels Produced by Electro Slag Remelting" Metallurgical and Materials Transactions; 2005; S. 36, 12.
- Ohmura T., Wakabayashi M. and Hosoda T. "A Heat Transfer Analysis of ESR Process," 5th Annual ESR Symposium Conference, 1983.
- Tae Gyoon Lim and Chang Woo Reu "Development of Human-Machine Interface for Automatic Control of Electro Slag Remelting Process " Research Institute of Science and Technology Pohang, 790-600 Korea,2002 S.1.
- Tetzlaff D. A. "Understanding the Physical Phenomena in the Electro Slag Remelting Process" Master Thesis, The University of Texas at Austin, Austin, Texas, 2000.
- Kemal Başaran "Cürufaltı eritme yöntemi" Marmara Bilimsel Ve Endüstriyel Araştırma Enstitüsü, Araştırma projesi notları İstanbul, 1982-1983

İNTERNET KAYNAKLARI

- [1] www.wacker.de
- [2] www.ald-vt.com
- [3] www.republicspecialmetals.com
- [4] www.sciencedirect.com
- [5] www.bucorp.com/pdfs/ensuring_mold_steel.pdf
- [6] www.gumrukler.gov.tr

EKLER

```

#include <stdio.h>
#include <math.h>
#include <stdlib.h>

// Kullanilan sabitler ///
#define N 91 // Izgara sayisi (dusey eksen icin)
#define M 12 // Izgara sayisi (radyal eksen icin)
#define DX 0.250 // Izgara birim araligi cm (dusey eksen)
#define DR 0.250 // Izgara birim araligi cm (radya eksen)
#define DT 3.125 // Zaman araligi saniye
#define R1 (DT)/(DX*DX) // R1 sabiti
#define R2 (DT)/(DR*DR) // R2 sabiti
#define HL 0.25 // Ingottan yuzeye IsI transfer katsayisi (sivi)
#define HM 0.20 // Ingottan yuzeye IsI transfer katsayisi (peltemsi)
#define HS 0.02 // Ingottan yuzeye IsI transfer katsayisi (kati)
#define CKL 0.051 // Ingotun isi iletkenligi (sivi)
#define CKM 0.060 // Ingotun isi iletkenligi (peltemsi)
#define CKS 0.075 // Ingotun isi iletkenligi (kati)
#define ERI 1320.0 // erime suresi
#define TC 30.0 // Cevre sicakligi oC
#define TM 1700.0 // Tepe sicakligi oC
////////////////////////////////////

void Gauss(double a[][N],double b[],double x[], int);
double alpha(double);
double h(double);

double X[N];

int main(void)
{
    int i,j,k,l;
    double TriDiag[N][N], a[N],b[N],c[N], d[N],T[N][M],Ts[N][M];
    double x[N],r[M];
    double t,p1,p2,H,HT;

    // t = 0 zamaninda cüruf sicaklik dagilimi
    for(i=0;i<N;i++){
        for(j=0;j<M;j++){
            T[i][j] = TC;
            T[N-1][j]= TM;
            Ts[i][j] = TC;
            Ts[N-1][j] = TM;
        }
    }

    for(i=0;i<N;i++)
        a[i] = b[i] = c[i] = d[i] = 0.0;

    for(i=0;i<N;i++) x[i] = DX*i;
    for(j=0;j<M;j++) r[j] = DR*j;

    //=====
    // I. yarI zaman
    //=====
    for(j=0;j<M;j++){
        for(i=0;i<N-1;i++){

```

```

    t = T[i][j];
    p1 = alpha(t)*R1;
    p2 = alpha(t)*R2;
    HT = h(t)*DX;
    H = h(t)*DR;

    /* dugum: I=1 ve J=1 */
    if(i==0 && j==0){
        a[i] = 0.0;
        b[i] = 1 + p1*(1+HT);
        c[i] = -p1;
        d[i] = (1-2*p2)*T[i][j] + 2*p2*T[i][j+1] + p1*HT*TC;
    }

    /* dugum: I=1 ve J=M */
    if(i==0 && j==M-1){
        a[i] = 0.0;
        b[i] = 1 + p1*(1+HT);
        c[i] = -p1;
        d[i] = p2*(2*r[j]-DR)/(2*r[j])*T[i][j-1] +
            (1-p2*((2*r[j]-DR)/(2*r[j])+H))*T[i][j] +
            p1*HT*TC + p2*H*TC;
    }

    /* taban dugumler: I=1 ve J=2,M-1 */
    if(i==0 && j>0 && j<M-1){
        a[i] = 0.0;
        b[i] = 1 + p1*(1+HT);
        c[i] = -p1;
        d[i] = p2*0.5*(2*r[j]-DR)/(2*r[j])*T[i][j-1] +
            (1-p2)*T[i][j] + p2*0.5*(2*r[j]+DR)/(2*r[j])*T[i][j+1] +
            2*p1*H*TC;
    }

    /* yuzey dugumler: I=2,N-1 ve J=M */
    if(i>0 && i<N-1 && j==M-1){
        a[i] = -p1;
        b[i] = 2*(1+p1);
        c[i] = -p1;
        d[i] = 2*p2*(2*r[j]-DR)/(2*r[j])*T[i][j-1] +
            2*(1-p2*((2*r[j]-DR)/(2*r[j])+H))*T[i][j] + 2*p2*H*TC;
    }

    /* eksen dugumler: I=2,N-1 ve J=1 */
    if(i>0 && i<N-1 && j==0){
        a[i] = -p1;
        b[i] = 2.0*(1.0+p1);
        c[i] = -p1;
        d[i] = 2*(1-p2)*T[i][j] + 4*p2*T[i][j+1];
    }

    /* ic dugumler: I=2,N-1 ve J=2,M-1 */
    if(i>0 && i<N-1 && j>0 && j<M-1){
        a[i] = -p1;
        b[i] = 2.0*(1.0+p1);
        c[i] = -p1;
        d[i] = p2*(2*r[j]-DR)/(2*r[j])*T[i][j-1] +
            2*(1-p2)*T[i][j] + p2*(2*r[j]+DR)/(2*r[j])*T[i][j+1];
    }
} //for i

```

```

// tri-diagonal matrix
for(k=0;k<N-1;k++){
for(l=0;l<N-1;l++){
    TriDiag[k][l] = 0.0;
    if(k==l+1) TriDiag[k][l] = a[k];
    if(k==l)    TriDiag[k][l] = b[k];
    if(k+1==l) TriDiag[k][l] = c[k];
}}

Gauss(TriDiag,d,X,N-1);
for(k=0;k<N-1;k++)
    T[k][j] = Ts[k][j] = X[k];
}

for(i=0;i<N;i++)
    a[i] = b[i] = c[i] = d[i] = 0.0;

//=====
// II. yarI zaman
//=====
for(i=0;i<N-1;i++){
for(j=0;j<M;j++){
    t = Ts[i][j];
    p1 = alpha(t)*R1;
    p2 = alpha(t)*R2;
    HT = h(t)*DX;
    H = h(t)*DR;

/* dugum: J=1 ve I=1 */
if(i==0 && j==0){
    a[j] = 0.0;
    b[j] = 1+2*p2;
    c[j] = -2*p2;
    d[j] = (1-p1*(1+HT))*Ts[i][j] + p1*Ts[i+1][j] + p1*HT*TC;
}

/* dugum: J=M ve I=1 */
if(j==M-1 && i==0){
    a[j] = -p2*(2*r[j]-DR)/(2*r[j]);
    b[j] = 1+p2*((2*r[j]-DR)/(2*r[j])+H);
    c[j] = 0.0;
    d[j] = (1-p1*(1+HT))*Ts[i][j] + p1*Ts[i+1][j] + p1*HT*TC + p2*H*TC;
}

/* taban dugum: J=2,M-1 ve I=1 */
if(j>0 && j<M-1 && i==0){
    a[j] = -p2*(2*r[j]-DR)/(2*r[j]);
    b[j] = 2*(1+p2);
    c[j] = -p2*(2*r[j]+DR)/(2*r[j]);
    d[j] = 2*(1-p1*(1+HT))*Ts[i][j] + 2*p1*Ts[i+1][j] + 2*p1*HT*TC;
}

/* yuzey dugum: J=M ve I=2,N-1 */
if(j==M-1 && i>0 && i<N-1){
    a[j] = -2*p2*(2*r[j]-DR)/(2*r[j]);
    b[j] = 2*(1+p2*((2*r[j]-DR)/(2*r[j])+H));
    c[j] = 0.0;
    d[j] = p1*Ts[i-1][j] + 2*(1-p1)*Ts[i][j] + p1*Ts[i+1][j] +
        2*p2*H*TC;
}

```

```

    /* eksen dugumler: J=1 ve I=2,N-1 */
    if(j==0 && i>0 && i<N-1){
        a[j] = 0.0;
        b[j] = 2*(1+2*p2);
        c[j] = -4*p2;
        d[j] = p1*Ts[i-1][j] + 2*(1-p1)*Ts[i][j] + p1*Ts[i+1][j];
    }

    /* ic dugumler: J=2,M-1 ve I=2,N-1 */
    if(j>0 && j<M-1 && i>0 && i<N-1 ){
        a[j] = -p2*(2*r[j]-DR)/(2*r[j]);
        b[j] = 2*(1+p2);
        c[j] = -p2*(2*r[j]+DR)/(2*r[j]);
        d[j] = p1*Ts[i-1][j] + 2*(1-p1)*Ts[i][j] + p1*Ts[i+1][j];
    }
} // for j

// tri-diagonal matris
for(k=0;k<M;k++){
    for(l=0;l<M;l++){
        TriDiag[k][l] = 0.0;
        if(k==l+1) TriDiag[k][l] = a[k];
        if(k==l) TriDiag[k][l] = b[k];
        if(k+1==l) TriDiag[k][l] = c[k];
        printf("%6.11f ",TriDiag[k][l]);
    }printf("\n");
    printf("\n");
    Gauss(TriDiag,d,X,M);
    for(k=0;k<M;k++)
        Ts[i][k]=T[i][k]=X[k];
}

// Sonuclar Ekrana
for(i=N-1;i>=0;i--){
    printf("%5.21f ",x[i]);
    for(j=0;j<M;j++)
        printf("%5d\t", (int) T[i][j]);
    printf("\n");
}

return 0;
} /* main */

//-----
// Bu fonksiyon t sicakligina bagli alpha (kalip diffuzivitesi gonderir
double alpha(double t){
    double aa;
    aa = 0.005;
    if(t<=1483.0) aa = 5.12e-3;
    if(t<=1427.0) aa = 47.20e-3;
    if(t<=750.0) aa = -9.44e-5*t + 119.25e-3;
    if(t<=450.0) aa = -4.80e-5*t + 97.39e-3;
    return aa;
}

//-----
//-----
// Bu fonksiyon t sicakligina bagli h (isi gecis katsayisi gonderir
double h(double t){
    double hh;

```

```

hh = HL/CKL;
if(t<=1483.0) hh = HM/CKM;
if(t<=1427.0) hh = HS/CKS;
if(t<=750.0)  hh = HS/CKS;
if(t<=450.0)  hh = HS/CKS;
return hh;
}
//-----

//-----
// Bu fonksiyon Gauss Eleme Yontemi ile
// AX=B turundeki denklem sistemini cozer
void Gauss(double a[][N],double b[],double X[],int n)
{
    double c[N][N],d[N];
    int i,j,k;
    double add;

    // a ve b dizilerini C ve D'de sakla
    for(i=0;i<n;i++){
        d[i]=b[i];
        for(j=0;j<n;j++){
            c[i][j] = a[i][j];
        }
    }

    // ileri eleme
    for(k=0;k<n-1;k++){
        for(i=k+1;i<n;i++){
            for(j=k+1;j<n;j++){
                c[i][j] -= c[i][k]*c[k][j]/c[k][k];
            }
            d[i] -= d[k]*c[i][k]/c[k][k];
        }
    }

    // geri yerlestirme
    X[n-1] = d[n-1]/c[n-1][n-1];
    for(i=n-2;i>=0;i--){
        add = 0.0;
        for(j=i+1;j<n;j++){
            add += c[i][j]*X[j];
        }
        X[i] = (d[i]-add)/c[i][i];
    }

} /* Gauss */
//-----

```

ÖZGEÇMİŞ

DOĞUM TARİHİ	:03.03.1982	
DOĞUM YERİ	:Kilis	
LİSE	:1993-2000	Tekerekoğlu Anadolu Lisesi
LİSANS	:2000-2004	Dumlupınar Ünv. Mühendislik Fakültesi Seramik Mühendisliği Bölümü
YÜKSEK LİSANS	:2004-	Yıldız Teknik Ünv. Fen Bilimleri Enstitüsü Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, Üretim Bölümü