

Kaynak İşlemi Sırasında Isı Geçişinin Deneysel Ve Teorik Analizi

Serkan Leblebici

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Haziran 2009

Experimental And Theoric Analysis Of Heat Transfer During Welding Process

Serkan Leblebici

MASTER OF SCIENCE THESIS

Department of Mechanical Engineering

June 2009

Kaynak İşlemi Sırasında Isı Geçişinin Deneysel Ve Teorik Analizi

Serkan Leblebici

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Lisansüstü Yönetmeliği Uyarınca
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı
Enerji-Termodinamik Bilim Dalında
YÜKSEK LİSANS TEZİ
Olarak Hazırlanmıştır

Danışman: Prof. Dr. L. Berrin Erbay

Haziran 2009

ONAY

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans öğrencisi Serkan Leblebici'in YÜKSEK LİSANS tezi olarak hazırladığı “Kaynak İşlemi Sırasında Isı Geçişinin Deneysel Ve Teorik Analizi ” başlıklı bu çalışma, jürimizce lisansüstü yönetmeliğin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek kabul edilmiştir.

Danışman : Prof. Dr. L. Berrin Erbay

İkinci Danışman : -----

Yüksek Lisans Tez Savunma Jürisi:

Üye : Prof. Dr. L. Berrin Erbay

Üye : Prof. Dr. Kemal Taner

Üye : Doç.Dr.Haydar Aras

Üye : Y.Doç.Dr.Mesut Tekalmaz

Üye : Y.Doç.Dr.Necati Mahir

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun tarih ve sayılı kararıyla onaylanmıştır. Prof. Dr. Nimetullah BURNAK Enstitü Müdürü

ÖZET

Bu çalışmada günümüzde imalat teknolojilerinde yaygın olarak kullanılan kaynaklı imalat ile ilgili olarak kaynak esnasında meydana gelen ısı yayılımı ve kaynak malzemesindeki ısı transferi üzerine durulmuştur. Kaynak enerji değerleri belirtilmiştir. Hareketli ısı kaynağının teorik ısı iletim denklemi olan Rosenthal denklemi üzerine durulmuştur. Rosenthal'ın almış olduğu ihmallere göre analitik formüller gösterilmiştir. Pik sıcaklığının yayılımı ile hareketli ısı kaynağı sonrası sıcaklık yayılımı için deney seti hazırlanıp kaynak yapılarak veriler kayıt edilmiştir. Bu veriler grafiksel olarak hazırlanıp incelenmiştir. Deney setine göre elde edilen veriler ışığında denklem geliştirilmiştir. Daha sonra ise sonlu eleman analizi için ANSYS bilgisayar yazılımı yardımıyla deneysel çalışma bilgisayar üzerinde modellenmiştir. Sonlu eleman analizine göre çıkan sonuçlar ile deneysel olarak yapılan çalışma sonrası elde ettiğimiz denklem karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak farklı noktalar için ANSYS üzerinden sonuçlar alınıp incelenmiştir.

Hem sonlu eleman analizi sonrası hem de deneysel analiz sonrası elde edilen veriler ve sonuçlar karşılaştırılıp yorumlar yapılmıştır. Benzerlikler belirtilmiş farklılıklar için ise başka çalışmalara ışık tutması amacıyla öneriler sunulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Kaynak, Isı transferi, ANSYS, Hareketli ısı kaynağı,

SUMMARY

In this study, nowadays welding used widespread at the product technologies ,which thermal diffusion and heat transfer over the welding part studied during welding process. Welding energy data have been explained. Rosenthal equation have been analyzed, which is motion heat source theory for heat conduction equation. Neglecting have been assumed in the analytical formula according to Rosenthal equation. Experimental setting has been prepared for peak temperature of diffusion and motion heat source of diffusion and data has been recorded. These data has been analyzed over the graphic. Equations have been improved according to the experimental setting. And then experimental study has been simulated on the computer according to ANSYS computer software for finite element analysis. Results of according to finite element analysis with study of experimental equation have been compared. As a result of different points have been get from calculation on ANSYS and they have been analyzed.

Both finite element analysis and experimental analysis have been compared to each other and have been commented. Similarities have been indicated and proposed for different properties in the future study.

Keywords: Welding, Heat transfer, ANSYS, Motion heat source

TEŞEKKÜR

Yüksek Lisansın süresince yapmış olduğum çalışmalarında, gerek derslerimde ve gerekse tez çalışmalarında, bana danışmanlık ederek, beni yönlendiren ve her türlü olanağı sağlayan danışmanım Sayın Prof. Dr. L. Berrin ERBAY'a teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

İÇ KAPAK	iii
KABUL VE ONAY SAYFASI	iv
ÖZET	v
SUMMARY	vi
TEŞEKKÜR	vii
İÇİNDEKİLER	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ	xi
ÇİZELGELER DİZİNİ	xiv
SİMGELER VE KISALTMALAR	xv
1. GİRİŞ.....	1
2. KAYNAKLI İMALAT	4
2.1.Giriş.....	4
2.2.Kaynaklı İmalatın Uygulama Alanları	6
3. KAYNAK UYGULAMALARINDA ISI TRANSFERİNİN ANALİTİK ÇÖZÜMÜ.....	7
3.1.Kaynak Makinesinin Enerji Tanımlamaları	8
3.2.Metal Yüzeyde Isı Yayılımı	9
3.2.1. Rosenthal Denklemi İle İletimsel Isı Transferi Analizi.....	10
3.2.1.1. Isı İletim Denklemleri.....	11
3.2.1.2. Noktasal Ark Denklemleri.....	15
3.2.1.3. Hareketli Isı Kaynağı Denklemleri.....	16
3.3.Taşınım ve Işınım İle Kaynağın Isı Yayınımı.....	22
4. DENEYSEL OLARAK KAYNAK İŞLEMİN ANALİZ EDİLMESİ.....	26
4.1. Deney Setinin Kurulumu.....	27
4.2. Noktasal Pik Sıcaklık Deneyi.....	30
4.2.1. Deneyin Açıklanması.....	30
4.2.2. Deney Sonuçlarının Alınması	31

4.2.3. Deney Sonuçlarının Yorumlanması.....	33
İÇİNDEKİLER(Devami)	
4.3.Hareketli Isı Kaynağı Sıcaklık Deneyi.....	34
4.3.1. Deneyin Açıklaması.....	34
4.3.2. Deney Sonuçlarının Alınması.....	35
4.3.3. Deney Sonuçlarının Yorumlanması.....	42
5. DENEYSEL MODELİN ANSYS İLE ANALİZ EDİLMESİ.....	44
5.1. Noktasal Pik Sıcaklığı İçin Analiz İşlemi.....	45
5.1.1. Problemin Belirlenmesi.....	45
5.1.2. Geometrik Modelin Oluşturulması.....	45
5.1.3. Malzeme Özelliklerinin Girilmesi.....	46
5.1.4. Ağ Yapısının Oluşturulması.....	51
5.1.5. Uygulanacak Sınır Şartları ve Yüklerin Belirlenmesi.....	54
5.1.6. Çözümün Yapılması.....	55
5.1.7. Sonuçların Alınması.....	58
5.2.Hareketli Isı Kaynağı İçin Analiz Edilmesi	62
5.2.1. Problemin Belirlenmesi.....	62
5.2.2. Geometrik Modelin Oluşturulması.....	64
5.2.3. Malzeme Özelliklerinin Girilmesi.....	65
5.2.4. Ağ Yapısının Oluşturulması.....	66
5.2.5. Uygulanacak Sınır Şartları ve Yüklerin Belirlenmesi.....	67
5.2.6. Çözümün Yapılması.....	68
5.2.7. Sonuçların Alınması.....	72
6. KAYNAK ANALİZ SONUÇLARININ KARŞILAŞTIRILMASI.....	80
7. TARTIŞMA VE GÖRÜŞ.....	82
KAYNAKLAR	83
EK AÇIKLAMALAR.....	85

EK AÇIKLAMALAR – A. ANSYS SOLID70 ve SOLID90 Element

Yapısı Özellikleri.....85

EK AÇIKLAMALAR – B. ANSYS Kodlari.....87

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
2.1. El ile yapılan Metal Ark Kaynağının basit gösterimi.....	4
2.2. MIG/MAG (Metal Inert Gas)/(Metal Active Gas) uygulamasının gösterimi.....	5
2.3. TIG (Tungsten Inert Gas) uygulamasının gösterimi	5
3.1. Kaynak akım üretici güç plakası (Anık,S., Dikicioğlu, A., Vural, M. ,1999)	9
3.2. a-Sabit (x,y,z) koordinat sistemi, b- Hareketli (ξ,η,ζ) koordinat sistemi.....	10
3.3. Isı kaynağının koordinat sistemindeki üzerindeki hareketi	11
3.4. Düzlemsel ısı kaynağının tek boyutta ısı iletim.....	13
3.5. Doğrusal ısı kaynağının iki boyutta ısı iletim.....	13
3.6. Noktasal ısı kaynağının üç boyutta ısı iletim.....	14
3.7. Ark kaynak noktasının eksen merkezi ve arka sınırı.....	19
3.8. Karbon çeliğinde iki boyutlu ısı akışı için kaynak havuzu arkasındaki teorik soğuma oranı.....	21
3.9. Karbon çeliğinde üç boyutlu ısı akışı için kaynak havuzu arkasındaki teorik soğuma oranı.....	22
4.1. Deneyde kullanılan kaynak makinesi ve kaynak robotu görünüşü.....	28
4.2. Deneyde kullanılan kaynak makinesi kontrol paneli görünüşü.....	28
4.3. Deney düzeneği ve sıcaklık ölçüm aleti ile kaynak numunesinin görünüşü.	29
4.4. Torcun kaynak deneyi için numune üzerindeki konumu ve sıcaklık ölçüm noktasının görünüşü.....	29
4.5. Sıcaklığın ölçüldüğü noktanın gösterilmesi.....	30
4.6. Kaynatılacak olan numunelerin görünüşü.....	31
4.7. Pik sıcaklık deneyi sonucu sıcaklık zaman grafiği.....	32
4.8. Sıcaklığın ölçüldüğü noktaların gösterilmesi.....	35

4.9.	1.Ölçüm noktası 0-20 sn aralığı ölçüm değerleri.....	38
4.10.	1.Ölçüm noktası 0-600 sn aralığı ölçüm değerleri.....	38
4.11.	2.Ölçüm noktası 0-20 sn aralığı ölçüm değerleri.....	39
4.12.	2.Ölçüm noktası 0-600 sn aralığı ölçüm değerleri.....	39
4.13.	3.Ölçüm noktası 0-20 sn aralığı ölçüm değerleri.....	40
4.14.	3.Ölçüm noktası 0-600 sn aralığı ölçüm değerleri.....	40
4.15.	Hareketli ısı kaynağının 3 noktadaki sıcaklıklarının tek bir grafikte gösterimi.....	41
4.16.	Hareketli ısı kaynağının 3 noktadaki sıcaklıklarının tek bir grafikte gösterimi.....	41
5.1.	St37-2 malzemesinin sıcaklık ölçüm noktası ve kaynak noktasının gösterilmesi.....	46
5.2.	Deneyde kullanılan numunenin Ansys üzerindeki geometrik tasarımı.....	47
5.3.	Ansys üzerindeki analizin iyi olması için geometrik tasarımın biçimlendirilmesi.....	47
5.4.	St37 Malzemenin yoğunluğu ve sıcaklığa bağlı termal özellikleri (Zuheir Barsoum)	48
5.5.	St-37 malzeme için ısı iletim katsayısının grafiksel gösterimi	50
5.6.	St-37 malzeme için özgül ısının grafiksel gösterimi.....	50
5.7.	Analiz yapılacak olan malzeme için ağ yapısının gösterimi.....	54
5.8.	0.02 sn sonraki sıcaklık dağılımının gösterilmesi.....	55
5.9.	0.30 sn sonraki sıcaklık dağılımının gösterilmesi.....	56
5.10.	1 sn sonraki sıcaklık dağılımının gösterilmesi.....	56
5.11.	10 sn sonraki sıcaklık dağılımının gösterilmesi.....	57
5.12.	30 sn sonraki sıcaklık dağılımının gösterilmesi.....	57
5.13.	60 sn sonraki sıcaklık dağılımının gösterilmesi.....	58
5.14.	Ark noktasından 5mm uzaklıktaki bir noktanın sıcaklığı zaman grafiği.....	59
5.15.	Ark noktasından 10mm uzaklıktaki bir noktanın sıcaklığı zaman grafiği....	59
5.16.	Ark noktasından 15mm uzaklıktaki bir noktanın sıcaklığı zaman grafiği....	60
5.17.	Ark noktasından 20mm uzaklıktaki bir noktanın sıcaklığı zaman grafiği...60	
5.18.	Ark noktasından 22,5mm uzaklıktaki bir noktanın sıcaklığı zaman	

grafiği.....	61
5.19. Ark noktasına göre farklı uzaklıklardaki noktalarını sıcaklık zaman grafiğinde ortak gösterimi.....	61
5.20. Ark noktasına göre minimum ve maksimum sıcaklık değişim aralığı.....	62
5.21. St37 malzemesi üzerine uygulanan kaynak dikişinin gösterilmesi	63
5.22. Dikdörtgen prizma modelinin geometrik gösterimi.....	65
5.23. Geometrik model üzerinde ağ yapısının gösterimi.....	66
5.24. 4 mm ² olan ısı akısı alanı ve ısı akısının bir element üzerindeki gösterimi.....	68
5.25. 1 sn sonraki sıcaklık dağılımının gösterilmesi.....	69
5.26. 8 sn sonraki sıcaklık dağılımının gösterilmesi.....	69
5.27. 16 sn sonraki sıcaklık dağılımının gösterilmesi.....	70
5.28. 30 sn sonraki sıcaklık dağılımının gösterilmesi.....	70
5.29. 60 sn sonraki sıcaklık dağılımının gösterilmesi.....	71
5.30. 120 sn sonraki sıcaklık dağılımının gösterilmesi.....	71
5.31. 600 sn sonraki sıcaklık dağılımının gösterilmesi.....	72
5.32. Hareketli ısı kaynağından 20 mm uzaklıktaki 1. ölçüm noktası sıcaklık grafiği.....	76
5.33. Hareketli ısı kaynağından 20 mm uzaklıktaki 2. ölçüm noktası sıcaklık grafiği.....	76
5.34. Hareketli ısı kaynağından 20 mm uzaklıktaki 3. ölçüm noktası sıcaklık grafiği.....	77
5.35. Hareketli ısı kaynağından 20 mm uzaklıktaki 3 noktanın 60 sn'lik sıcaklık grafiği.....	77
5.36. Hareketli ısı kaynağından 20 mm uzaklıktaki 3 noktanın 600 sn'lik sıcaklık grafiği.....	78
5.37. Hareketli ısı kaynağından 20 mm ve 10 mm uzaklıktaki 6 noktanın 20 sn'lik sıcaklık grafiği.....	78
5.38. Hareketli ısı kaynağından 20 mm ve 10 mm uzaklıktaki 6 noktanın 60 sn'lik sıcaklık grafiği.....	79

ÇİZELGE DİZİNİ

<u>Cizelge</u>	<u>Sayfa</u>
2.1. Isı kaynak güçlerine göre ark kaynak yöntemleri(Bos,E.,2007).....	6
4.1. Pik sıcaklık deneyi sonucu sıcaklık zaman tablosu.....	33
4.2. Hareketli ısı kaynağı sonucu oluşan sıcaklık değerlerinin gösterilmesi.....	36
4.3. Ölçüm noktalarının farklı sıcaklıklar için denklemleri.....	43
5.1. St37 Malzemenin yoğunluğu ve sıcaklığa bağlı termal özellikleri (Zuheir Barsoum)	49
5.2. Ansys ile yapılan analiz sonucu SOLID90 element tipi için ark noktasına belirli uzaklıktaki sıcaklıkların zamanla değişimleri	52
5.3. Ansys ile yapılan analiz sonucu SOLID70 element tipi için ark noktasına belirli uzaklıktaki sıcaklıkların zamanla değişimleri.....	53
5.4. Kaynak makinesi ile verilen ısı değerleri ile akım ve gerilim değerlerinin gösterimi.....	63
5.5. Hareketli ısı kaynağı analizi için ölçülen noktaların çizelge halinde gösterimi.....	73
6.1. Deneysel analizi ile analitik analiz sonrası elde edilen soğuma sürelerinin karşılaştırılması.....	81

KISALTMALAR

<u>Simgeler</u>	<u>Acıklama</u>
A	Düzlemsel kesit alanı, yüzey alanı (mm^2)
A_{TY}	Toplam yüzey alanı (mm^2)
c	Isıl kapasite (J / grK)
d	Parça veya malzeme kalınlığı (mm)
F_{1-2}	Isı transferi yüzeyleri arasındaki şekil faktörü
g	Yerçekimi ivmesi
Gr	Grashof katsayısı
h	Taşınım katsayısı sabiti ($\text{W} / \text{m}^2\text{K}$)
$H_c - H_0$	Referans sıcaklıktaki ısı entalpisi (j / mm^3)
I	Kaynak akımı
k	Termal iletim katsayısı (W / mK)
L_c	Karakteristik uzunluk (m)
Nu	Nusselt sayısı
Pr	Prandtl sayısı
q_0	Net ark gücü (w)
Q	Isı kaynağından iş parçasına verilen enerji (W)
Q'	Birim uzunluktaki bir ısı kaynağından iş parçasına verilen enerji(W/m)
Q''	Birim alandaki bir ısı kaynağından iş parçasına verilen enerji (W / m^2)
Ra	Rayleigh sayısı
t	Zaman (sn)
t_i	Pik(Ark) temas süresi (sn)
T	Sıcaklık ($^{\circ}\text{C}$)
T_c, T_m	Erime sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)

T_0	Sonsuz başlangıç ve ortam sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)
T_s	Yüzey sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)
T_{∞}	Akışkan sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)
u	Sabit hız (mm/sn)
V	Kaynak voltajı
α	Termal yayılım (mm^2 / sn)
ρ	Hacimsel yoğunluk (gr / mm^3)
ε	Işınım için yayılım katsayısı
η	Kaynak verimi
θ_m	Tanımlanmış erime sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)
θ_0	Tanımlanmış plaka sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)
θ_p	Ark sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)
θ_T	Tanımlama sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)
θ	Boyutsuz sıcaklık parametresi
τ_i	Boyutsuz zaman parametresi
n_i	Boyutsuz operasyon parametresi
σ	Stefan Boltzman ışınlama sabiti ($\text{W} / \text{m}^2\text{K}^4$)
σ_i	Boyutsuz yarıçap vektörü
β	Hacimsel genleşme katsayısı ($1/273$)
ν	Kinematik viskozite

1. GİRİŞ

Hareketli ısı kaynağı prensibinin en çok kullanıldığı imalat yöntemi olan kaynaklı imalat için kaynak işleminin bulunduğu bölgede gösterdiği ısı transferi birçok akademik çevre tarafından incelenmiştir. Kaynak işlemi gerçekleşirken kaynak torcunun hareketine ve konumuna bağlı olarak kaynak metali üzerine birçok ısı girişi olmakta, bunun sonucu ısıнын yayınımı prensibi ile verilen ısı enerjisi etrafa belirli bir hızda yayılmakta ve daha sonra ortam sıcaklığı ile dengeye gelmektedir.

Zhou ve Tsai'nin yapmış oldukları çalışmada kaynak işlemi sırasında ortamda meydana gelen ısı ve faz değişimini incelemişlerdir.(Feng, Z.,2005) Malzemenin hem fiziksel özelliklerinin hem de metalürjik özelliklerinin faz değişimi ile değiştiği gözlemlemişlerdir. Farklı kaynak teknolojilerinin gelişmesinde faz değişimlerinin önemli bir yer tuttuğu konusunda fikirleri vardır. Kaynak havuzunda ısı transferinin iletim ve taşınım ile olabileceğini düşünmüşlerdir. Daha çok taşınımsal ısı transferi için kütle transferi ve enerji transferi konularına ait denklemler üzerinde çalışmışlardır.

Wisconsin Üniversitesinden Sindo Kou ise kaynak metalurjisi isimli yazmış olduğu kitabında kaynak türlerinden ergitme(füzyon) kaynağı için kütle transferi ve ısı transferi konularını açıklamıştır. Kaynaklı bölgedeki ısı akısı ve enerji değişimi için kalorimetre kabı deneyleri üzerine değinmiştir. Kitabında kaynak esnasındaki faz değişimlerinin güçlü etkileri ve kaynağın özelliklerinden de söz etmiştir. (Kou, S., 2003)

Gonçalves ve arkadaşları 2005 yılında yayınladıkları makalede kaynak işlemi sırasındaki ısı değişimleri için deneysel bir çalışma yapmışlardır. Deneysel çalışma sonrası kaynaklı bölgede ısı transferinin kaynak işlemi bittikten sonrası içinde soğuma işlemi olarak devam ettiğinden söz etmişlerdir. Kaynak işlemlerinin endüstride yapısal imalatla çok yaygın olarak kullanıldığından bahsetmişlerdir. Bu sebeple kaynak geometrisi üzerinde çalışmışlardır. Rosenthal modelinin çok iyi bir kaynaklı imalata ısı transferi seçeneği olduğunu göstermişlerdir. (Gonçalves, C.V. ve diğerleri, 2006,)

Çin’de bulunan Harbin Kaynak Enstitüsünde çalışmalarını yürüten Wei, Dong, Liu ve Pan isimli araştırmacılar kaynaklı imalatla kaynak olaylarını incelemektedirler. Kaynak yüzeyinde meydana gelen ısı değişimi sonrası katı fazda maddenin çökmesini ile oluşan çatlakları incelenmişlerdir. Bu çalışma ile ilgili deneysel düzenek kurup malzeme üzerinde ısının tesiri ile oluşan gerilemeleri hesaplamışlardır. Kaynak havuzundaki akışkan akışının sıcaklık yayılımında büyük bir etkisi olduğundan bahsetmişlerdir. Bunu ifade eden grafiksel hesaplamaları göstermişlerdir. Sonlu eleman analizi yaparak malzeme üzerinde mekaniksel ve metalürjik değişimleri incelemişlerdir. Almanya ‘da Polskinhin ve arkadaşları ise meydana gelen çatlaklıkları sonlu elemanlar yöntemi ile simülasyon etmişlerdir. (Böllinghaus, T., 2005)

2000 yılında Pan Jiluan’ın yazdığı kitapta ise kaynak arkının kontrolünden bahsetmiştir. Kaynak yöntemi bununla ilgili kaynak elektrodu ve telinin kaynak üzerine etkileri ile kaynak havuzunun ve kaynak ısısının nasıl kontrol edilmesi gerektiği konularında çalışmalar yapmıştır. (Julian, P., 2003)

Norveç üniversitesinde Grong da yüksek pik sıcaklığı, yüksek sıcaklık gradyanı ve hızlı sıcaklık yayılımı ile ilgili çalışmalar yapmıştır. Soğuma oranı hesabı için boyutsuz sayılar ortaya koyup formüller üretmiştir. (Grong, Φ , 1996)

Song ve arkadaşları da Çin’de yazmış oldukları bir makalede sonlu eleman analizi ile ısı transferinin tungsten ark kaynağı için incelemişlerdir. Analizlerinde kullanılan numune malzemenin termal özelliklerini, sıcaklığın fonksiyonu şeklinde belirtmişlerdir. Belirli nokta aralıkları ile malzeme üzerinde olası sıcaklık değerlerini almışlardır. (Lv, S., ve diğerleri, 2008)

Kermanpur ve arkadaşları ise üç boyutlu olarak silindirik bir malzeme üzerinde kaynak sırasında ortaya çıkan sıcaklık değişimlerinin incelemişlerdir. Hareketli ısı kaynağı ile ilgili bu analizde ANSYS programını kullanmışlardır. Bu programda SOLID70 element yapısında taşınım sal etkiler için sınır şartlarını girerek analiz yapmışlardır. (Kermanpur, A., ve diğerleri, 2008)

Kaynaklı imalat üzerinde yapılmış olan birçok ısı transferi analizinde Rosenthal tarafından geliştirilen ısı yayılımı denklemleri kullanılmıştır. Bu denklemler genellikle analitik hesaplamalar için hareketli bir ısı kaynağının oluşturduğu ısı yayılımı denklemleridir. Daha sonraki çalışmalarda bu denklemlere benzer olarak geliştirilmiş olan 2 boyutlu ısı yayılımı ve 3 boyutlu ısı yayılımı için Adams denklemleri vardır. Bu sistemlerde genellikle ihmaller söz konusu olmuştur. Bunlardan yola çıkarak sonlu eleman analizlerinde ise aynı ihmaller söz konusudur.

Bu çalışmada ise teorik ısı yayılımı denklemleri anlatıldıktan sonra deneysel analiz gerçekleştirilmiş olup daha sonra ise Kermanpur ve arkadaşlarının yapmış oldukları ANSYS üzerinde benzer bir ısı analizi yapılmıştır. İki farklı deney yapılarak hem noktasal ark şiddetinin ısı analizi çıkartılmıştır. Hem de kaynak torcunun malzeme üzerindeki hareketine bağlı olarak oluşturduğu ısı yayılımı için hareketli ısı kaynağı analizi yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar daha sonra incelenmiş çizilen grafiklere göre kaynak üzerinde ısı transferi için genel denklemler oluşturulmuştur.

2. KAYNAKLI İMALAT

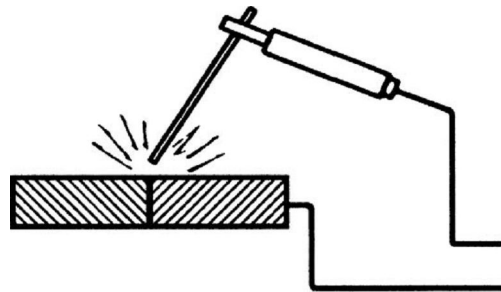
2.1. Giriş

Kaynaklı imalatın genel tanımı için şöyle denilmektedir. İki tane aynı metal, ya da iki tane ayrı metalin ısı kullanarak veya basınç kullanarak ilave elektrot kullanmadan ya da kullanarak yapılmış olan tahribatsız sökülemeyen birleştirme işlemi diye adlandırılır.

Demir çağından günümüze kadar geçen süre içerisinde ise değişik türdeki ve aynı türdeki metallerin kaynaklı imalat yöntemlerinde birçok kez değişimler yaşanmıştır. Bu değişimler sonucunda günümüzde birçok kaynaklı birleştirme yöntemleri ortaya çıkmıştır. Bu yöntemler bir çok farklı kitap ve makalede yaygın olarak iki gruba ayrılmaktadır. Bunlar;

- Basınç kaynağı,
- Ergitme kaynağıdır.

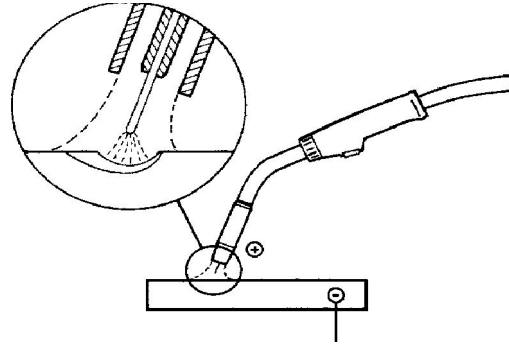
2003 yılında Weman'ın yazmış olduğu kitapta bu iki gruptaki kaynak yöntemlerinin gelişim süreçleri ve kaynağın tarihçesi için 19. Yüzyılda elektriğin kullanılmasının artması ile kaynaklı imalatların yaygınlaşmış olmasıdır. Bemodas tarafından geliştirilen ilk karbon elektrotu bu yüzyılda kullanılmış olup daha sonraları Oscar Kjellberg ise bu elektrotu örtülü elektrot olarak geliştirmiştir. (Weman K., 2003) (Şekil 2.1.)



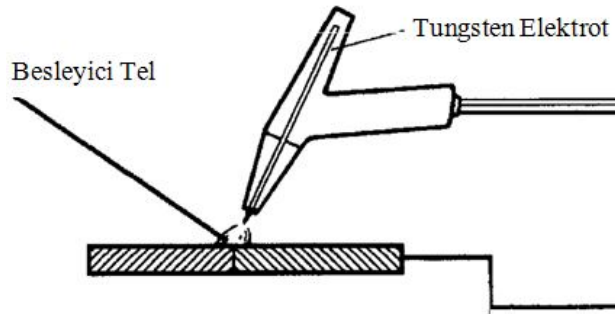
Şekil 2.1. El ile yapılan Metal Ark Kaynağının basit gösterimi

Asetilen ve oksijen kaynağı ise farklı bir metod olarak günümüze kadar geliştirilmiş olan yüksek alev alma özellikli gaz kaynağı yöntemidir. Otomatik tel besleme işlemleri 1930'lu yıllarda denenmiş ve birçok uygulamada başarılı olmuştur. Örtülü ark kaynağı uygulamaları da bu dönemde Amerika'da denenmiş ikinci dünya savaşında uygulanmıştır. TIG (Tungsten Inert Gas) kaynağı olarak bilinen kaynak yönteminde bu yıllarda denenmiş ve imalat sektöründe ilk kez kullanılmıştır. daha sonraki yıllarda kaynak yöntemleri açısından MIG/MAG (Metal Inert Gas) kaynağı uygulamaları geliştirilmiştir. Zaruba ve Potapevski CO₂ gazı denemesini bu uygulamalar için yapmışlardır. Bu gazın derin nüfuziyet etkisi dikkatleri üzerine çekse de derin nüfuziyetin sonucunda kaynak malzemesinde sıçramalar görülmüştür. Bu sebeple %20 oranında Argon karışımı CO₂ gazları ortaya çıkmıştır. (Şekil 2.2.), (Şekil 2.3.)

Bu anlatılan kaynaklara ilave olarak basınç kaynağı kapsamında ise punta kaynakları ve sürtünme kaynakları mevcuttur.



Şekil 2.2. MIG/MAG (Metal Inert Gas)/(Metal Active Gas) uygulamasının gösterimi



Şekil 2.3. TIG (Tungsten Inert Gas) uygulamasının gösterimi

2.2. Kaynaklı İmalatın Uygulama Alanları

Günümüzde özellikle doğal gaz ve petrol taşıma işinde en ekonomik çözüm olarak boru hattı sistemi kullanılmaktadır. Boru hattı borularının imalatından servise alınışına kadar temel işlem kaynağıdır. Genellikle boru hatlarında kullanılan dikişli borular elektrik direnç kaynağı, TIG, MIG/MAG veya tozaltı kaynak usulü ile spiral veya düz kaynaklı borular kullanılarak üretilirler. Ayrıca boruların birbirleriyle birleştirilmesi de kaynakla yapılmaktadır. Buna ilave olarak konstrüksiyon inşaatlarda bazı köprü korumalıklarında ve yapılarında kaynak işlemi kullanılmaktadır.

Bakır, alüminyum, pirinç ve inoks gibi malzemelere uygulanan kaynaklı birleştirmeler ise makine imalat sektöründe ve savunma sanayinde kullanılmaktadır. Bunlara ilave olarak seri imalatın çok yaygın olduğu sektörlerde punta kaynağı ve robot kaynağı uygulamaları da vardır.

Bu tür uygulamalara göre ve arzu edilen konstrüksiyonlara göre kullanılan malzemelerin ve malzeme ebatlarının değişiklik göstermesi, kaynak açısından gerekli ısı girdisinin de değişmesine neden olmaktadır. Gereken ısı girdisi değişiminin kolayca sağlandığı ve günümüz endüstrisinde en fazla uygulama alanı bulmuş ark esaslı kaynak yöntemleri, ısı kaynak güçlerine göre sıralanışı Tablo 2.1. de gösterilmiştir. (Bos,E,2007)

Tablo 2.1. Isı kaynak güçlerine göre ark kaynak yöntemleri(Bos,E.,2007)

Yöntem	Isı Kaynak Gücü
TIG(WIG) Kaynağı	0,1-8 kJ/s
Plazma Kaynağı	0,3-20 kJ/s
Elektrik Ark Kaynağı	0,5-28 kJ/s
MIG/MAG Kaynağı	1-42 kJ/s
Toz Altı Kaynağı	8-80 kJ/s

3. KAYNAK UYGULAMALARINDA ISI TRANSFERİNİN ANALİTİK ÇÖZÜMÜ

Kaynak esnasında meydana gelen ısı transferi olayının açıklanması ile ilgili olarak yapılan analitik çözümler ve türetilen denklemler vardır. Kaynak işlemi yapılırken malzeme üzerine verilen ısı enerjisi ve kaynak bittikten sonraki periyotta malzemenin soğuması sonucu oluşan etkiler ile malzeme üzerinde bir ısı değişimi oluşmaktadır. Bu ısı değişiminin incelenmesi ve kaynak uygulamaları da ortaya çıkan problemlerin çözümü için bir çok araştırmacı analitik hesaplamalar yapmışlardır.

Genel olarak kaynak uygulamalarında ısı transferinin sonucu ortaya çıkan problemlerin başında ise malzemenin üzerinde görülen ısı değişimleri ve faz dönüşümleridir. Bir malzeme üzerinde çok fazla ısı değişimi oluşması sonucu malzeme deformasyonu olmaktadır. Kaynaklı birleştirme sırasında malzeme üzerine ani olarak noktasal ısı akısı verilmekte ve malzeme zamana bağlı olarak kendi üzerindeki ısıyı çevreye termodinamik kanunlar çerçevesinde vererek ortam sıcaklığı ile dengeye gelene kadar soğuma yapmaktadır. Bu işlemin hızlı veya yavaş olması malzeme üzerinde mekanik gerilmelere sebep vermekte olup, bunların engellenmesi amacıyla malzeme üzerindeki sıcaklık değişimleri için ısı transferi analizi yapılarak ısı değişimi kontrol altına alınır. (Deyev G.,Devey D.,2005)

Malzeme üzerindeki mekanik hatalara bağlı olarak diğer bir problem ise aynı kaynak kalitesinin düşük ısı enerjisiyle ve yavaş kaynak hızı ile elde etmek yerine yüksek ısı enerjisi ve hızlı kaynak hızı ile elde etmeye çalışmaktır. Bunun sonucu ise fazladan kaynak enerjisi kullanılmaktadır. Kaynak hızının ve arkta bulunan kaynak ısı akısının kontrollü ile de enerji tasarrufu sağlanabilmektedir.

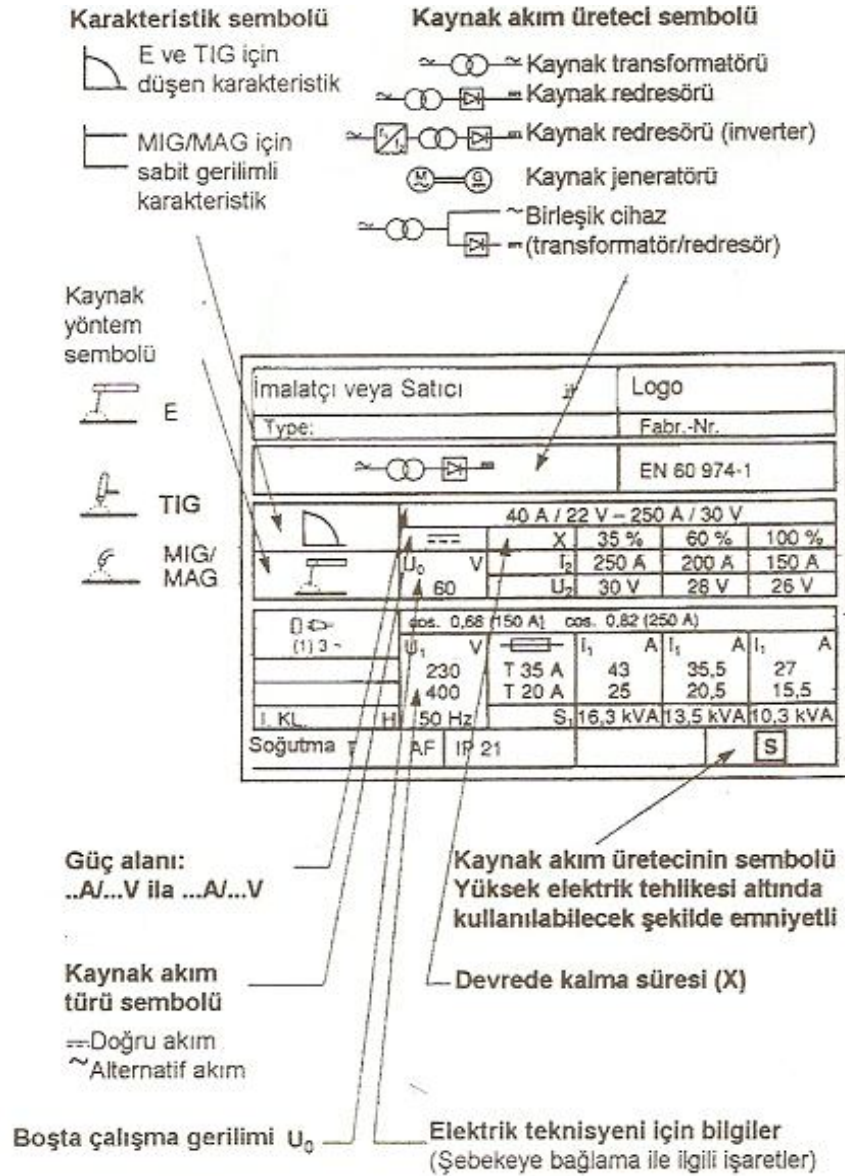
Ayrıca bu problemlerin dışında kaynaklı imalatın seri olduğu veya yoğun kaynak işleminin olduğu yerlerde sabit aparat üzerinde kaynak yapılması sonucu sabit aparatın sıcaklık değeri ortam şartları ile dengeye gelinceye kadar artmaktadır. Bunun sonucu olarak da belirli bir sıcaklıkta dengeye gelen aparatın sıcaklığı uygun ise sıcak

su veya kojenerasyon uygulaması yapılabilir. Bu sayede kaynak işleminde verilen ısı akısından bir enerji kazancımız olur. Bu tür işlemler içinde kaynaklı malzeme üzerinde ısı analizi yapma gereksinimi ortaya çıkmaktadır.

3.1. Kaynak Makinesinin Enerji Tanımlamaları

Kaynak makinesinde özellikle yüksek akım ve düşük gerilimin oluşması için akım üreteçleri kullanılır. Bu akım üreteçleri gerekli olan kaynak ark akımını üretirken almış oldukları şebeke gerilimini de düşürmektedirler. Kaynak redresörü, kaynak jeneratörü ve elektronik akım üretici gibi değişik türde olabilirler. Kaynak makinelerin hepsinde buluna kaynak etiketinde kaynak makinesine ait gerilim ve akım değerleri ile nominal çalışma aralıkları gösterilmektedir. Ayrıca güç alanı devreye alma süresi ve kaynak akım üretici türü gibi bilgilerde bulunmaktadır. (Şekil 3.1.), (Anık,S., ve diğerleri, 1999)

Kaynak makinelerinde ısı enerjisinin oluşması için gerekli olan elektrik enerjisi akım ve gerilimi çarpımı sonucu ortaya çıkmaktadır. Isı kaynağı olarak tepki veren akım ve gerilim değerleri ile metal malzeme erime sıcaklığına ulaşmaktadır.



Şekil 3.1. Kaynak akım üretici güç plakası (Anık,S., ve diğerleri, 1999)

3.2. Metal Yüzeyde Isı Yayınmı

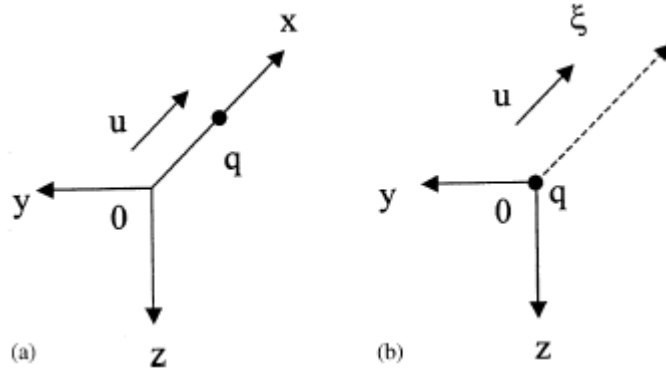
Kaynaklı imalatla meydana gelen ısı problemlerinin çözümü için farklı ısı transferi analizleri yapılmaktadır. Yapılan ısı transferi analizlerin tamamen doğru ve gerçekçi yapılması amacıyla ısı transfer çeşitleri olan iletim, taşınım ve ışınmının hepsinin doğru ve hassas bir şekilde uygulanması gerekmektedir. Isı transferinin oluşmasına sebep olan hareketli bir ısı akısının doğru ve hassas olarak hesaplanması ise karmaşık ve zordur. Bu nedenle çözüm kolaylığı sağlaması açısından ısı analizinde

kullanılan bazı parametreler veya taşınım ve ışıınım gibi ısı transfer türleri için bir takım kabuller ve ihmaller yapılması gerekmektedir.

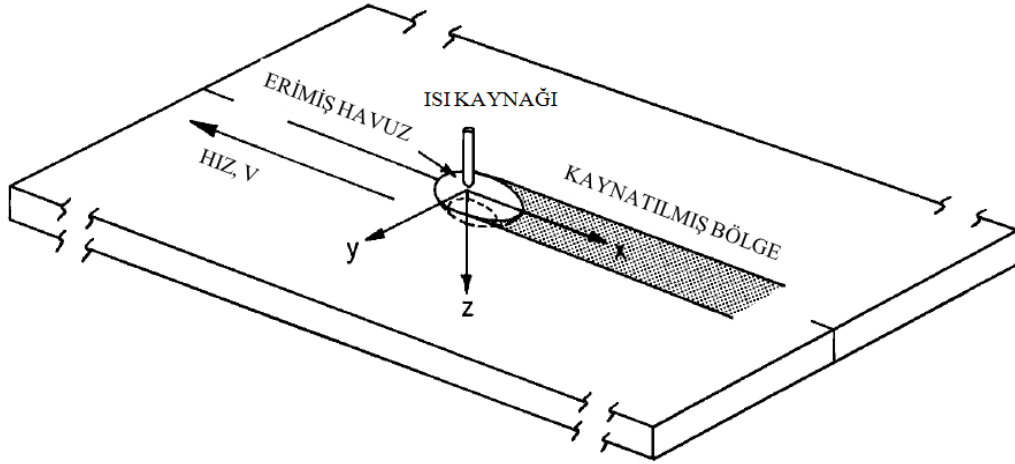
Genel olarak ısı transferi ve ısı analizi yapılması sırasında ortamda meydana gelen enerji değişimleri süreklilik denklemi ve enerji denklemleri ile de ifade edilerek bir termodinamik denklik sağlanmaya çalışılmasına rağmen taşınımın veya ışıınımın ihmal edilmesi gibi durumların oluşu termodinamik denklik sağlanması konusunda sorun çıkarmaktadır. Bunun çözümü için adım adım hesaplama yöntemi kullanılır. Bunun dışında taşınım ve ışıınım ihmal edilebiliyorsa sadece iletim ile ısı transferi için geliştirilmiş olan en yaygın yöntem Rosenthal denklemi ile ısı analizidir. (Gonçalves, C.V., ve diğerleri, 2006)

3.2.1. Rosenthal Denklemi İle İletimsel ısı Transferi Analizi

Rosenthal 1941 yılında ısı kaynağının zamana bağlı hareketi ile ilgili bir denklem önerisinde bulunmuştur. Bu düşüncede ısı kaynağı enerjisinin sabit u hızı ile sabit bir x eksen koordinatı boyunca hareket ettiğini modellemiştir. (Şekil 3.2.), (Şekil 3.3.) Bir gözlemci tarafından ise ısı akısının hareketi ve sıcaklık dağılımlarının değişmesi de gözlemlenmiştir. Ayrıca aynı gözlemci ile birlikte erimiş malzeme havuzunun geometrisinin de zamanla değişmediği gözlemlenmektedir. Bu işlem sırasında ısı akısının sürekli durumda akışı için basitleştirilmiş matematiksel denklemler vardır. (Gonçalves, C.V., ve diğerleri, 2006), (Kou, S, 2003)



Şekil 3.2. a-Sabit (x, y, z) koordinat sistemi, b- Hareketli (ξ, y, z) koordinat sistemi



Şekil 3.3. Isı kaynağının koordinat sistemindeki üzerindeki hareketi

Rosenthal'in kaynak esnasında ısı akısının analitik hesabı için kullandığı basit varsayımlar şunlardır;

- a-Sürekli durumda ısı akısı,
- b-Nokta ısı kaynağı,
- c-Sabit termal özellikler,
- d-Parça yüzeyindeki taşınım ve ışıınım ısı kayıpları yoktur,
- e-Kaynak havuzundaki taşınım ve ışıınım ısı kayıpları yoktur,
- f-Erime ısısı ihmal edilmiştir.

3.2.1.1 Isı İletim Denklemleri

Bu yöntemde kullanılan denklemlerde taşınım ve ışıınım ile gerçekleşen ısı kayıpları ihmal edilir. Sıcaklık yayılımı genellikle katılarda meydana gelen ısı iletiminin diferansiyel denklemi şeklinde oluşur. Tek boyutlu ısı iletimi için ise genel denklem şöyle yazılır: (Gonçalves, C.V. ve diğerleri, 2006), (Kou, S, 2003)

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (3.1)$$

Burada T sıcaklığı, t zamanı, x tek boyutta ısı akısı yönünü ve α da termal yayılımı göstermektedir. Buradaki termal yayılım ise termal iletkenlik katsayısının (k)

hacimsel yoğunluk ve ısı kapasiteye (ρ, c) oranı şeklindedir. Birimi SI sisteminde m^2 / sn dir.

$$\alpha = \frac{k}{\rho c} \quad (3.2)$$

Denklem (3.1) de tek boyutlu ısı iletimi gösterilmesine rağmen iki boyutlu ve üç boyutlu ısı iletimi içinde sırasıyla denklem (3.3) ve (3.4) aşağıdaki gibi yazılır:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \left[\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right] \quad (3.3)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \left[\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right] \quad (3.4)$$

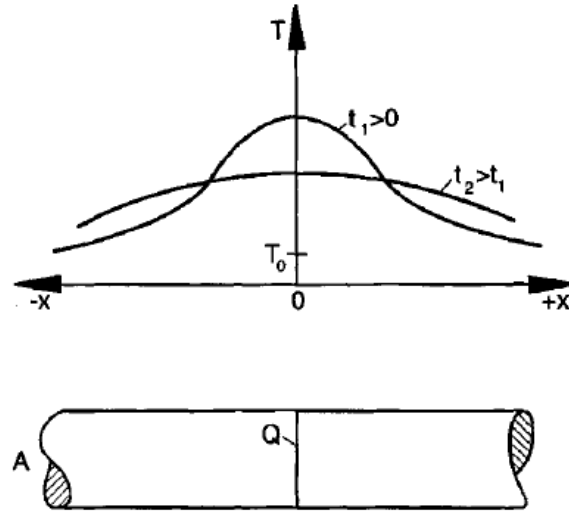
Isı iletim problemlerinde genellikle ani ısı kaynağı kullanımı vardır. Görülür ki bu problemlerdeki temel varsayım, ısıtının $t=0$ anında ortaya çıkması ile düzlemsel, doğrusal ve noktasal ısı kaynağı olarak sonsuz bir orta başlangıç sıcaklığı T_0 vardır. (Şekil 3.4.) Malzeme dışında ısı kaynağı $x = \pm\infty$ için düzlemsel ise bir çubuk boyunca, $r = \infty$ için doğrusal ise geniş bir yüzey üzerinde, $R = \infty$ için ise noktasal olarak kalın bir katı da yayılarak genişlediği varsayılır. (Grong, Φ , 1996)

Başlangıç ve sınır şartları ise aşağıdaki gibi ifade edilebilir;

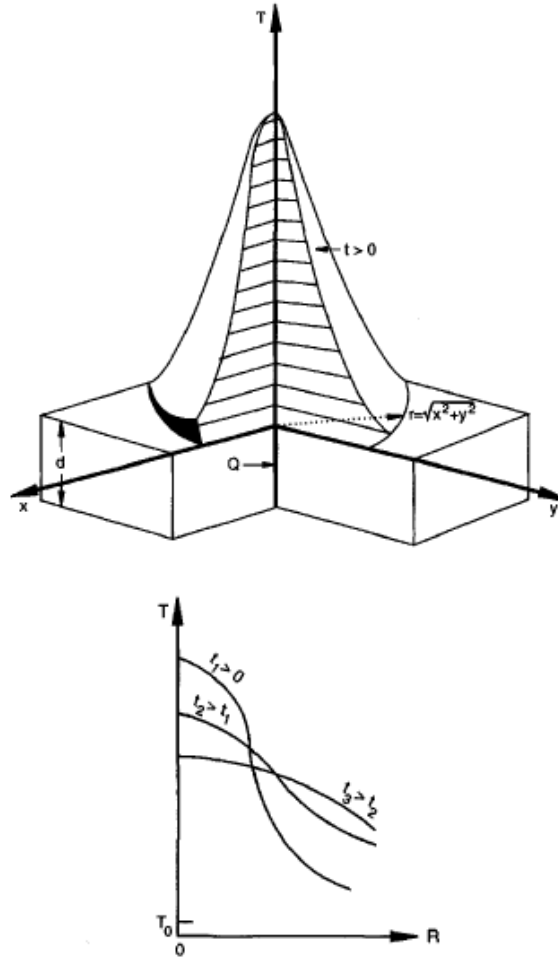
$$T - T_0 = \infty \text{ için } t = 0 \text{ ve } x = 0$$

$$T - T_0 = 0 \text{ için } t = 0 \text{ ve } x \neq 0$$

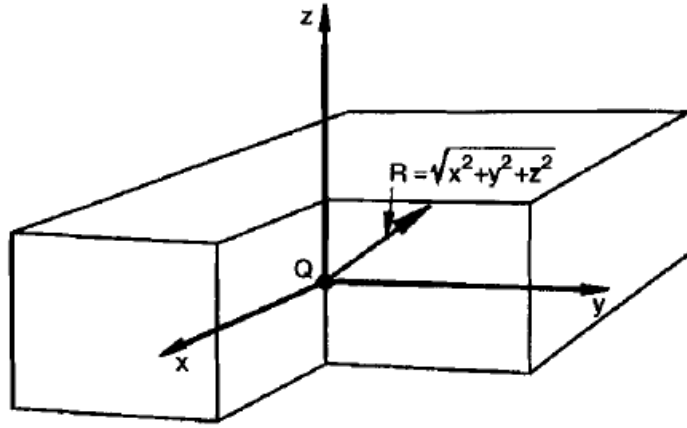
$$T - T_0 = 0 \text{ için } 0 < t < \infty \text{ ve } x = \pm\infty$$



Şekil 3.4. Düzlemsel ısı kaynağının tek boyutta ısı iletim



Şekil 3.5. Doğrusal ısı kaynağının iki boyutta ısı iletim



Şekil 3.6. Noktasal ısı kaynağının üç boyutta ısı iletim

Isının iletimi ile ilgili olarak diferansiyel denklemler çözümlenirse düzlemsel ısı kaynağının bulunduğu uzun bir çubuk için; (Şekil 3.4.)

$$T - T_0 = \frac{Q/A}{\rho c(4\pi\alpha t)^{1/2}} \exp(-x^2/4\alpha t) \quad (3.5)$$

Doğrusal ısı kaynağının bulunduğu geniş bir yüzey için; (Şekil 3.5.)

$$T - T_0 = \frac{Q/d}{\rho c(4\pi\alpha t)} \exp(-r^2/4\alpha t) \quad (3.6)$$

Noktasal ısı kaynağının bulunduğu kalın bir kütük için; (Şekil 3.6.)

$$T - T_0 = \frac{Q}{\rho c(4\pi\alpha t)^{3/2}} \exp(-R^2/4\alpha t) \quad (3.7)$$

denklemleri oluşur.

Burada Q ısı kaynağından iş parçasına olan ısı transferini, A düzlemsel ısı kaynağında kesit alanı, d doğrusal ısı kaynağında parça kalınlığını vermektedir. Genellikle ısı kaynağından gelen ısı miktarı için kaynak akımı I ve kaynak voltajı V ile kaynak türüne göre kaynak veriminin η çarpılması şeklinde elde edilir.

$$Q = \eta \cdot V \cdot I \quad (3.8)$$

$$r = \sqrt{x^2 + y^2} \quad (3.9)$$

$$R = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \quad (3.10)$$

3.2.1.2. Noktasal Ark Denklemleri

Noktasal ark kaynağında denklem (3.7.) uygulanmaktadır. Bu denklem için ısının anlık olarak $t=0$ anında yüzeyde olduğu varsayılır. Bu sebeple malzeme üzerindeki ısı yükselir ve denklemden hesaplanır. (Grong, Φ , 1996)

Denklem (3.7.) den kullanışlı boyutsuz formlar yazılır. Bu boyutsuz parametreler şu şekilde tanımlanır:

Boyutsuz sıcaklık parametresi

$$\theta = \frac{(T - T_0)}{(T_c - T_0)} \quad (3.11)$$

T_c burada malzemenin erime sıcaklığıdır. Veya herhangi bir nokta için referans sıcaklığı olarak da kullanılabilir.

Boyutsuz zaman parametresi

$$\tau_i = \frac{t}{t_i} \quad (3.12)$$

t_i ifadesi de burada ark temas süresidir.

Boyutsuz operasyon parametresi

$$n_i = \frac{2Q}{\rho c(T_c - T_0)(4\pi\alpha t_i)^{3/2}} = \frac{q_0}{4(H_c - H_0)(\pi\alpha)^{3/2} t_i^{1/2}} \quad (3.13)$$

q_0 değeri net ark gücüdür ve (Q/t_i) eşittir. Ayrıca $(H_c - H_0)$ de referans sıcaklıkta birim hacimdeki ısı entalpisidir.

Boyutsuz yarıçap vektörü

$$\sigma_1 = \sqrt{R^2 / 4\alpha t_i} \quad (3.14)$$

Bu parametreler denklem (3.7) de yerine konulursa;

$$\frac{\theta}{n_i} = \frac{1}{(\tau_1)^{3/2}} \text{Exp}\left[-(\sigma_1)^2 / \tau_1\right] \quad (3.15)$$

Bu denklemde çözümlenirse eğer aşağıdaki denklem elde edilir;

$$\frac{\theta_p}{n_i} = \frac{1}{(e\tau_{1m})^{3/2}} = \frac{1}{(2e/3)^{3/2} (\sigma_{1m})^3} \quad (3.16)$$

Buradaki θ_p ark sıcaklığıdır. e ise doğal logaritmik sayıdır.

3.2.1.3. Hareketli Isı Kaynağı Denklemleri

Genellikle füzyon (ergitme) kaynak işlemlerinde yüzey boyunca sürekli temas ile bir noktadan yüksek güç yoğunluklu bir ısı kaynağı uygulanır. Termal analizde ise hareketli ısı kaynağı etkisi alışılmış duruma göre sabit gibi durur ve koordinat

sisteminde orijinde yerleşmiştir diye düşünülür. Katıdaki hareketi pozitif x yönünde ve u hızı ile hareket oluşmaktadır. Bu sonuç itibari ile ısı yayılımı düzgün gemi dalgalanması veya izi gibi olur. Yapılan benzetmelerden dolayı de ısı yayılımı değişmeyen olduğu düşünülür ve buna da yarı değişmeyen durum adı verilir. (Lancaster, J. F)

(Şekil 3.2) Hareketli bir ısı kaynağı için ξ, y, z koordinat sisteminde $\xi = x - ut$ yazılırsa üç boyutlu eksen de ısı iletimi şöyle olur:

$$\frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} - \frac{u}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial x} = \left[\frac{\partial^2 T}{\partial \xi^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right] \quad (3.17)$$

(3.17) nolu denklem ve (3.5) nolu denklemlere göre düzlemsel ısı kaynağının birim alana verdiği ısı ile hareket etmesi sonucu sonlu bir plaka için u hızında sıcaklık denklemi;

$$(T - T_0) = \frac{Q''}{\rho c u} \quad \text{Eğer } x > 0 \quad (3.18a)$$

$$(T - T_0) = \frac{Q''}{\rho c u} e^{ux/\alpha} \quad \text{Eğer } x < 0 \quad (3.18b)$$

(3.17) nolu denklem ve (3.6) nolu denklemlere göre doğrusal ısı kaynağının birim uzunluğa verdiği ısı ile hareket etmesi sonucu sonlu bir plaka için u hızında sıcaklık denklemi;

$$(T - T_0) = \frac{Q'}{2\pi k d} \text{Exp}\left(\frac{u\xi}{2\alpha}\right) K_0\left(\frac{ur}{2\alpha}\right) \quad (3.19)$$

(3.17) nolu denklem ve (3.7) nolu denklemlere göre noktasal ısı kaynağının hareket etmesi sonucu yarı sonlu bir katı yüzey için u hızında sıcaklık denklemi;

$$(T - T_0) = \frac{Q}{2\pi kd} \text{Exp}\left(\frac{-u(R - x)}{2\alpha}\right) \quad (3.20)$$

Burada gösterilmiş olan K_0 ifadesi düzeltilmiş sıfırıncı basamakta birinci tür Bessel fonksiyonudur.

Denklem (3.18) ile bir kaynak elektrotunu katı kısmındaki ısıнын sıvı kısmına göre uzaklığı sonucunda oluşturduğu sıcaklık dağılımı denklemi verilmiştir. Denklem (3.19) da ki çözümleme ile bir elektron ışını veya lazer ışını gibi ısı kaynaklarının ince plakayı kesmek üzere yaptıkları tek dikişli kaynak yaklaşımı vardır. Denklem (3.20) de bulunan çözümleme ile de kalın plaka üzerine birçok dikişli kaynak yaklaşımı söz konusudur.

Füzyon (ergitme) kaynağında noktasal ve doğrusal ısı kaynağı için sıcaklık yayılımı söz konusudur. $y=0$ noktasında ki merkezden sabit bir uzaklık için t nin bir fonksiyonu olarak T sıcaklık grafiğinin çizimi için Termal Çevrim uygulaması oluşturulur.

Füzyon (ergitme) kaynağında en önemli değişkenlerden bir tanesi de ısıdan etkilenmiş bölgedeki Soğuma Oranı'dır. Denklem (3.19) ve (3.20) gösterilen diferansiyel hesaplamalara göre herhangi bir nokta için teorik olarak soğuma oranı orijindeki ısı kaynağına bağlı olabilir. Bu denklemler üç boyutlu durum için;

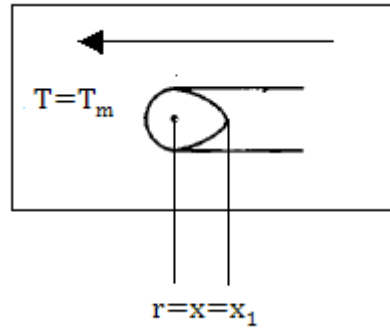
$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{uT}{r} \left[\frac{x}{r} - \frac{ur}{2\alpha} \left(1 - \frac{x}{r} \right) \right] \quad (3.21)$$

Ve iki boyutlu durum için;

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{u^2 T}{2\alpha} \left[\frac{\left(\frac{x}{r}\right) K_1\left(\frac{ur}{2\alpha}\right)}{K_0\left(\frac{ur}{2\alpha}\right)} - 1 \right] \quad (3.22)$$

olmaktadır.

Burada gösterilmiş olan K_0 ve K_1 ifadeleri düzeltilmiş birinci tür Bessel fonksiyonlarıdır.



Şekil 3.7. Ark kaynak noktasının eksen merkezi ve arka sınırı

Kolaylık sağlaması açısından kaynak merkez eksenindeki bir noktanın gerisinde kalan sınır bölgeye uzaklık $r=x=x_1$ ve erime sıcaklığı $T=T_m$ için üç boyutlu akış da Denklem (3.21) şöyle düzenlenir; (Şekil 3.7.)

$$\frac{\partial T}{\partial t} = -\frac{u T_m}{x_1} \quad (3.23)$$

Ve iki boyutlu için ise akış şöyledir;

$$\frac{\partial T}{\partial t} = -\frac{u^2 T_m}{2\alpha} \left[\frac{K_1\left(\frac{ux_1}{2\alpha}\right)}{K_0\left(\frac{ux_1}{2\alpha}\right)} - 1 \right] \quad (3.24)$$

Denklem (3.23) den tahmin edilir ki soğuma oranı kaynak hızı arttığı zaman kaynağın aktığı yöndeki kenarda artacaktır. Benzer şekilde kaynak hızı yükselecek ve kaynak havuzu daha küçük olacaktır. Soğuma oranı iki boyutlu akışta benzer bir çizgi trendi şeklinde takip ederken genellikle üç boyutlu akışta benzer şartlar altında yarısı şeklinde takip etmektedir. (Şekil 3.8 ve 3.9) Verilen ısınn yüzey üzerine etkimesi ile ilgili olarak ısıl iletkenlik denklemi olan denklem (3.25) yardımıyla denklem (3.23) aşağıdaki gibi olur.

$$Q = 2\pi rKT_m \quad (3.25)$$

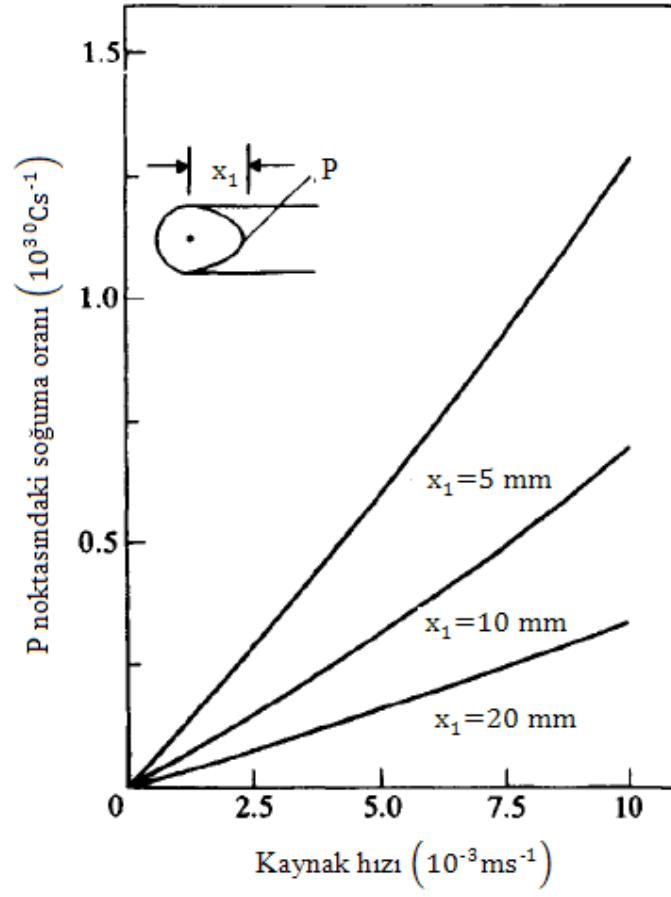
$$\frac{\partial T}{\partial t} = -\frac{2\pi KT_m^2}{Q/u} \quad (3.26)$$

Burada q/u parametresi ile kaynak havuzunun arka eksenı boyunca ki soğuma oranı ters orantılıdır. Bu miktar Isı Giriş Oranı diye ifade edilir ve kaynağının ısı akışı şartlarında bir karşılaştırma referansı olarak kullanılır. Herhangi bir, iki adet kaynak havuzu boyutu ve ısı giriş oranı soğuma oranı göstergelerinden kolaylıkla gözlemlenebilir. Kaynağa başlandığında metalin fazla sıcaklığından dolayı bütün bu durumlarda sıcaklığa bakılır. Tanımlama sıcaklığı olarak ise θ_T kullanılırken erime sıcaklığı θ_m ve plaka sıcaklığı θ_0 için ise aşağıdaki denklem kullanılır.

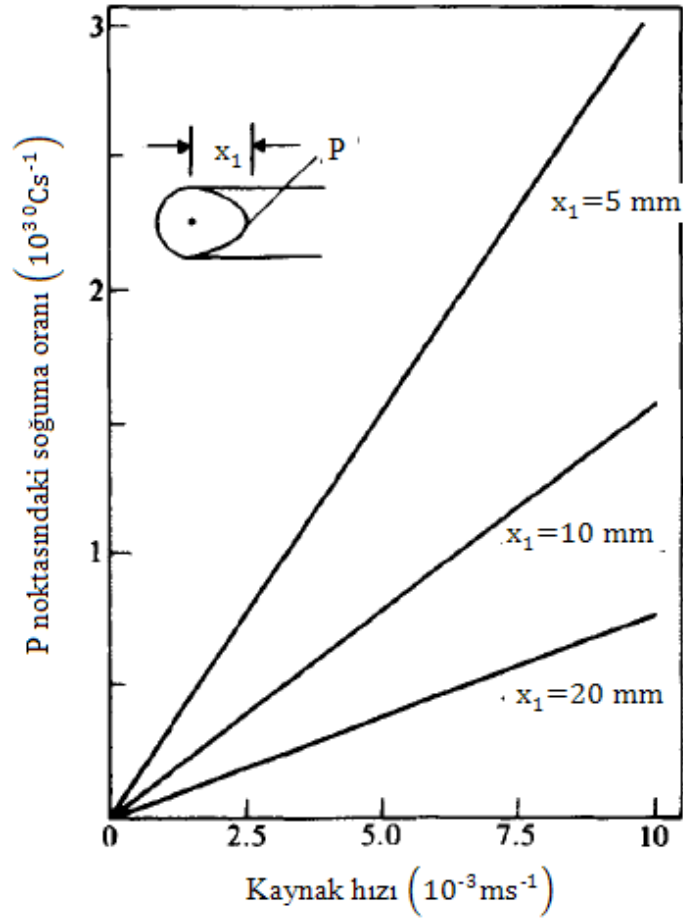
$$T = \theta_T - \theta_0 \quad (3.27)$$

$$T_m = \theta_m - \theta_0 \quad (3.28)$$

Eğer metal önceden ısıtılmış ise θ_0 önceden ısıtılmış sıcaklıktır.



Şekil 3.8. Karbon çeliğinde iki boyutlu ısı akışı için kaynak havuzu arkasındaki teorik soğuma oranı



Şekil 3.9. Karbon çeliğinde üç boyutlu ısı akışı için kaynak havuzu arkasındaki teorik soğuma oranı

3.3. Taşınım ve Işınım İle Kaynağın Isı Yayınmı

Kaynak bölgesindeki ısı akısının ve sıcaklık sonuçlarının deneysel olarak karşılaştırılmasında çeşitli sınır şartları uygulanır. Kaynak akısı için basit bir modelde sabit bir erime sıcaklığı uygulanması tarafından sınır şartı geçişli Guass ısı akısı olarak birleştirilir. Bu modelle sabit erime sıcaklığında ısı akısı 0.01 s ve 1,5 s civarında izlenir. Daha sonra bu modelin 60 s süre ile doğal taşınım ile soğuması da gözlemlenir. (Chaudhri, A. ve diğerleri, 2007)

Önceki bölümlerde iletim ile meydana gelen ısı analiz için Rosenthal denkleminde yararlanılmıştı. Taşınım ve ışınlam bu denklemlerde ihmal edilmesi

sebebiyle sınır şartı olarak belirlenmemiştir. Fakat uygulamada kaynak edilen malzeme üzerinde bütün yüzeylerde taşınım sınır şartı vardır. Bu sınır şartı için yatay yüzeylerde ve dikey yüzeylerde doğal taşınım bağıntıları seçilerek ısı veriminde hesaplanmaktadır.

Eşsıcaklıklı dikey bir plaka üzerindeki doğal taşınımsal akış için süreklilik, momentum ve enerji denklemleri kullanılır. Bu denklemler boyutsuz parametreler yardımıyla Grashof Sayısına dönüştürülür.

$$Gr = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)L_c^3}{\nu^2} \quad (3.29)$$

Burada β ile gösterilen hacimsel genleşme katsayısı, g ile gösterilen yerçekimi ivmesi, L_c ile gösterilen geometrik uzunluk, ν ile gösterilen kinematik viskozite, T_s ile gösterilen yüzey sıcaklığı ve T_∞ ile gösterilen ise akışkan sıcaklığıdır.

Zorlanmış taşınımında kullanılan boyutsuz Reynold Sayısı akışkana etki eden atalet kuvvetleri oranı ve viskoz kuvvetler sonucu belirlenirken, doğal taşınımında ise boyutsuz Grashof sayısı ise akışkana etki eden akışkanın kaldırma kuvvetleri oranı ve viskoz kuvvetler sonucu belirlenir.

Doğal taşınımında rol oynayan Grashof sayısı akışkanın laminar veya türbülanslı olmasında ana faktördür. Eğer dikey bir plaka üzerindeki akışkanın Grashof sayısı 10^9 'dan küçük ise akışkan laminar, büyük ise türbülanslıdır.

Yüzey üzerindeki doğal taşınım için basit bir ilişki ile ortalama Nusselt Sayısı belirlenir.

$$Nu = \frac{hL_c}{k} = C Ra_L^n \quad (3.30)$$

Denklem (3.30) da gösterilen Rayleigh Sayısı Ra_L dır. Buradaki h ise taşınım katsayısı k ise iletim katsayısıdır.

$$Ra_L = Gr_L Pr = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)L_c^3 Pr}{\nu^2} \quad (3.31)$$

Katı bir yüzey üzerinden doğal taşınım ile kaybedilen ısı için Newton'un soğuma yasasına göre denklem şöyle ifade edilir;

$$Q_T = hA_{TY}(T_s - T_\infty) \quad (3.32)$$

Burada A_{TY} toplam yüzey alanıdır.

Taşınım katsayısını bulmak için kullanılan boyutsuz ifadeler yüzeyin yatay ve dikey olmasına göre değişkenlik gösterebilmektedir. Dikey bir yüzeyde meydana gelen doğal taşınım için Nusselt sayısı şöyledir;

$$Nu_L = \left\{ 0,825 + \frac{0,387Ra_L^{1/6}}{\left[1 + \left(\frac{0,492}{Pr} \right)^{9/16} \right]^{8/27}} \right\}^2 \quad (3.33)$$

Yatay bir plaka üzerinden doğal taşınım ile ısı transferi için Nusselt sayısı ise;

$$Nu_L = 0.54Ra_L^{1/4} \quad (3.34)$$

Yatay bir plaka altından doğal taşınım ile ısı transferi için Nusselt sayısı ise;

$$Nu_L = 0.27Ra_L^{1/4} \quad (3.35)$$

Kaynak işlemi sırasında kaynak bölgesinde ve kaynak noktasında yüksek sıcaklık sonucu ısıtım ve taşınım etkisi fazla iken kaynak bölgesinden çok uzak noktalardaki sıcaklık ise daha düşük seviyelerdedir. Bu durum karşısında her nokta için

en küçük kareler metodu ile hesaplama yapmamız gerekmektedir. Özellikle kaynak bölgesi ve çevresi için bu hesaplamanın hassas olması açısından daha detaylı çalışılması gerekmektedir. Fakat taşınım ve ışıınım katsayılarının kaynak bölgesinin herhangi bir x yönünde hareket etmesi sonucu noktasal olarak değişkenlik göstermesidir. Bunun kontrol altına alınması zamanın fonksiyonu şeklinde adım adım iterasyon uygulaması ile belirli bir oranda mümkündür.

Hareketli ısı kaynağı için ışıınım sınır şartı ise aşağıdaki denklem ile sağlanır;

$$Q = \varepsilon \sigma F_{1-2} (T_{\text{ort}}^4 - T_{\infty}^4) \quad (3.36)$$

Buradaki değerlerden yayınım katsayısı $\varepsilon = 0.28$ çelikler için oda sıcaklığında, F_{1-2} değeri ise ısı transferinin gerçekleştiği yüzeyler arasındaki şekil faktörüdür. Stefan Boltzman sabiti ise $\sigma = 5.67051 \times 10^{-8} \text{ W / m}^2 \text{ K}^4$ olarak ifade edilmektedir.

4. DENEYSEL OLARAK KAYNAK İŞLEMİN ANALİZ EDİLMESİ

Genelde kaynak işlemi ile ilgili olarak ısı analizi yapılırken deney uygulaması yapılmaktadır. Birçok farklı metot ile kaynaklı imalat için sıcaklık ve ısı ölçüm deneyi yapılabilmektedir. Bunların başında noktasal veya bölgesel ısı ölçümleri gelmektedir. Bunların dışında ise kalorimetre kabı ile sıcaklık ölçümü de uygulanan yöntemlerdendir. Bu yöntemlerin uygulanması imkanlar doğrultusunda gerçekleştirilmektedir.

Kaynak noktasının ve ark noktasının sıcaklığının ölçülmesi için yüksek sıcaklıkları ölçebilen cihazlara ihtiyaç vardır. Genellikle de bu cihazlar termal kameralar olmaktadır. Fakat fiyatları çok yüksektir. Bunların dışında noktasal sıcaklıkların ölçülmesi için parlaklığa karşı duyarlı olmayan lazer termometreler kullanılabilir. Bunların dışında ark noktasının aşırı parlak olmasından dolayı normal infrared lazer termometreler ile hassas ölçüm yapılamamaktadır. Bunun sebebi ise madde üzerindeki ışık yayılımının ve yansımanın parlaklık ile değişkenlik göstermesidir. Bundan dolayı normal lazer termometreler ile kaynak noktasından belirli bir uzaklıktaki bir noktanın ısı ve sıcaklığı ölçülebilir.

Bunların haricinde deneylerde kullanılan termokuplar ve transmitler gibi ölçüm aletleri ile ise direk ark bölgesinin sıcaklık noktası da ölçülememektedir. Bunun sebebi ise aşırı sıcak bölge ile yüzde yüz temasın olması şartıdır. Ayrıca termokup gibi ölçüm aletleri yüzeyle temas sonucu ısıl genleşme katsayılarına göre çalıştıkları için hızlı bir şekilde tepki verememektedirler. Bunun yerine belirli noktalardan belirli zamanlar için ölçümler alınır.

Kaynak işlemi ile ilgili olarak ısı analizi için anlatılan hareketli ısı kaynağı ve pik sıcaklık değerlerinin analitik hesaplamaları doğrultusunda sıcaklık dağılımlarının teorik ile pratikte nasıl bir sonuç verdiğini gözlemlemek amacıyla deneysel çalışma yapılmıştır. Bu çalışma için ise ölçüm aleti olarak infrared lazer termometre kullanılmıştır. Sıcaklık ölçüm üst değerinin 1000°C 'den düşük olması sebebiyle

belirli noktalardan ölçüm alınmıştır. Daha sonra ise bu noktalara göre kaynak bölgesine tesir eden ısıнын dağılımı ile ilgili veriler elde edilmiştir. Deneysel sonuçlar ile elde edilen veriler ışığında ise kaynak işleminde ısı yayınının kontrollü için neler yapılabileceği ile ilgili varsayımlarda bulunulmuştur.

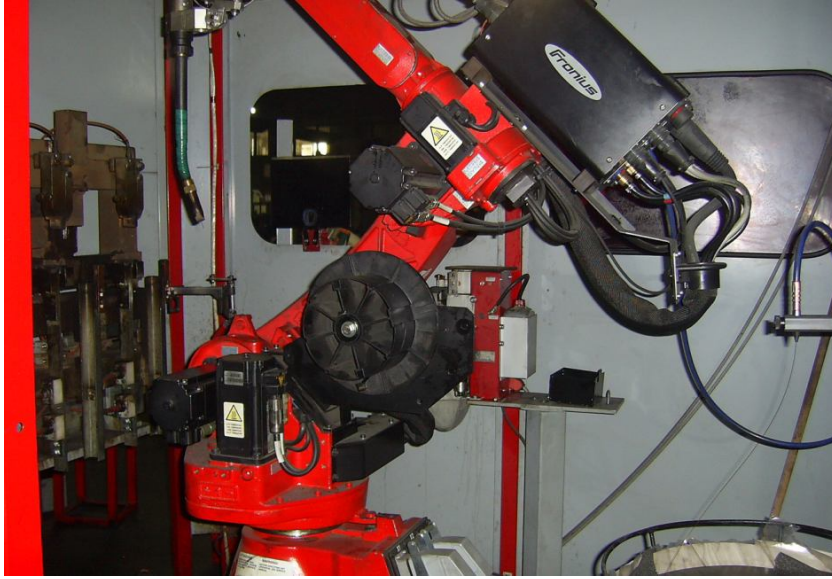
Bu deneysel çalışma için ise bir adet deney seti hazırlanmış ve MAG kaynağı kullanılarak çalışılmıştır. Deney çalışmasının hassas ve uygun olması amacıyla kaynak robotu kullanılmıştır. Veriler ise infrared lazer termometre ve video aracılığıyla zaman bağlı olarak kayıt edilmiştir.

İki farklı analiz için deney yapılmıştır. Bunlardan birincisi kaynak işleminde puntalama olarak da adlandırılan arkin oluşmasındaki noktasal pik sıcaklık değeri deneyidir. İkinci analiz ise hareketli ısı kaynağının yapmış olduğu kaynak işlemi sırasındaki hareketine bağlı ısı yayınının analizidir. Her iki analizde kullanılan deney seti ve numunelerde aynı özelliktedir.

4.1. Deney Setinin Kurulumu

Deneyi gerçekleştirirken Şekil 4.1. ve 4.2. de gösterildiği gibi Comau marka 6 eksenli bir kaynak robotu ile Fronius Transsinerjic 4000 Marka MAG kaynak ünitesi kullanılmıştır.

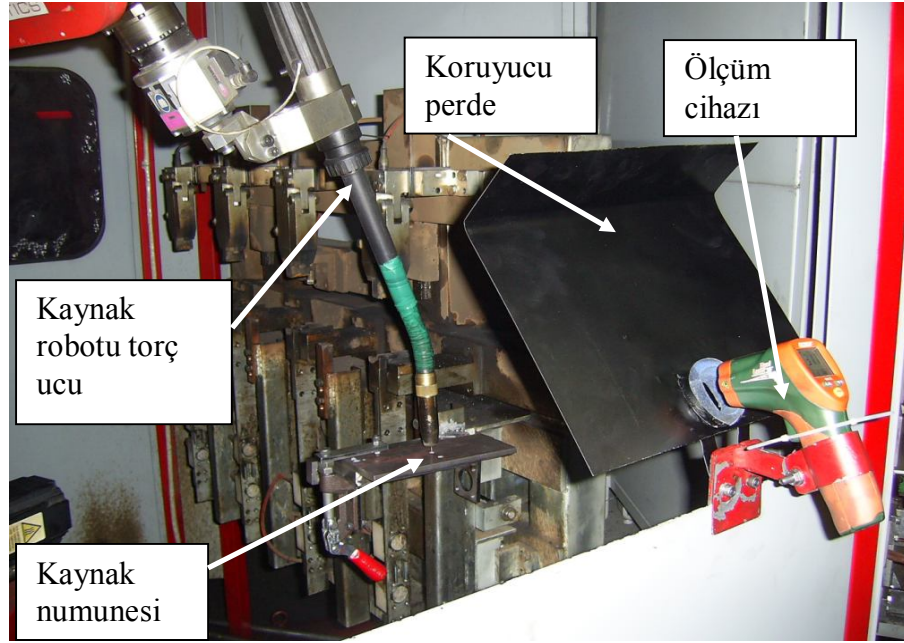
Deneyde elde edilen verilerin kayıt edilmesi için EXTECH 42512 marka infrared lazer termometre kullanılmıştır. Şekil 4.3. de gösterildiği gibi bir düzenek oluşturulmuştur. Ölçülen değerler video kamera yardımıyla kayıt edilmiştir. Daha sonra bilgisayar ortamında bu değerler belirli zaman aralıkları olarak düzenlenmiştir.



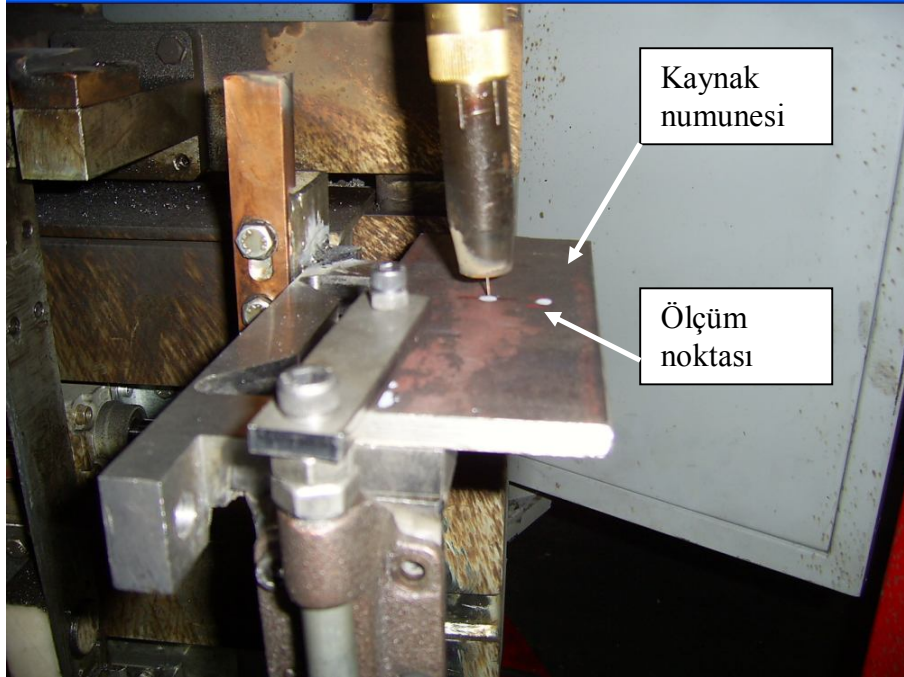
Şekil 4.1. Deneyde kullanılan kaynak makinesi ve kaynak robotu görünüşü



Şekil 4.2. Deneyde kullanılan MAG kaynak makinesi kontrol paneli görünüşü



Şekil 4.3. Deney düzeneği ve sıcaklık ölçüm aleti ile kaynak numunesinin görünüşü



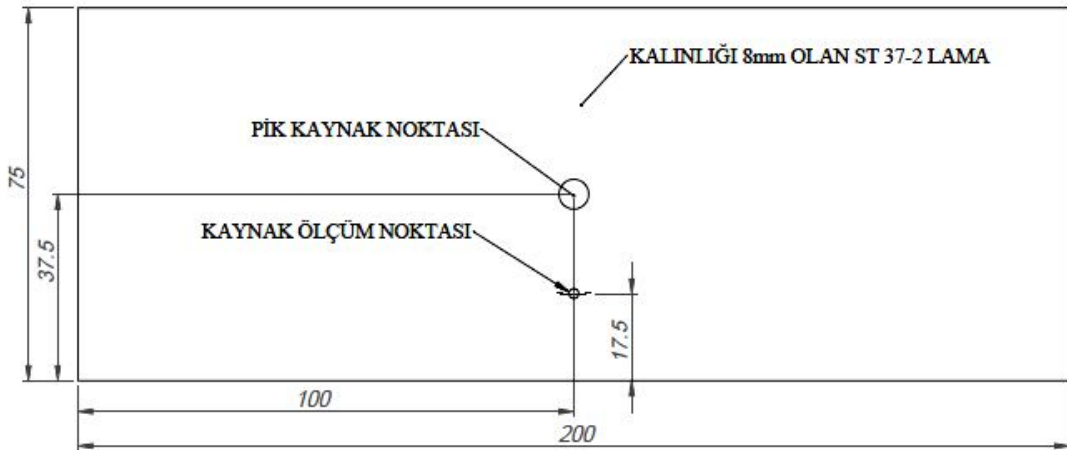
Şekil 4.4. Torcun kaynak deneyi için numune üzerindeki konumu ve sıcaklık ölçüm noktasının görünüşü

4.2. Noktasal Pik Sıcaklık Deneyi

4.2.1. Deneyin Açıklanması

Kaynak işleminde kaynağın ilk başlangıç anında oluşturulan pik veya ark için kısa süreli bir deneydir. Şekil 4.5. ve 4.6. de gösterildiği gibi bir noktadan ark değeri sonucu oluşan sıcaklık kayıt edilmiştir. St37 lama malzemeye 0,3 sn süre ile kaynak makinesinin kaynak torc ucunun sabit noktasal teması söz konusudur. Kaynak işlemi sırasında 180 A akım değeri robota girilmesine rağmen ark yapılması sırasında elektriksel direnç kuvvetleri ve ortam şartları gereği ortalama 175-185 A akım verilmektedir. Bununla birlikte ortalama voltajda 23-25 V arasında bir gerilimdir.

Toplam olarak ark sıcaklığı hesabı için 2 adet deney yapılmıştır. Ark noktasının merkezinden 20mm uzaklıkta bir noktanın sıcaklığı ölçülmek istenmiştir. Bu ölçüm sırasında kullanılan infared lazer termometre üzerinde iki adet lazer nokta olması ve bu noktaların ortalama yarıçap değeri üzerinden çalışması sebebiyle 20mm uzaklıktaki nokta için alt ve üst noktalar tanımlanmalıdır. Bunlar ise 15mm ile 23mm arası bir değerdir.



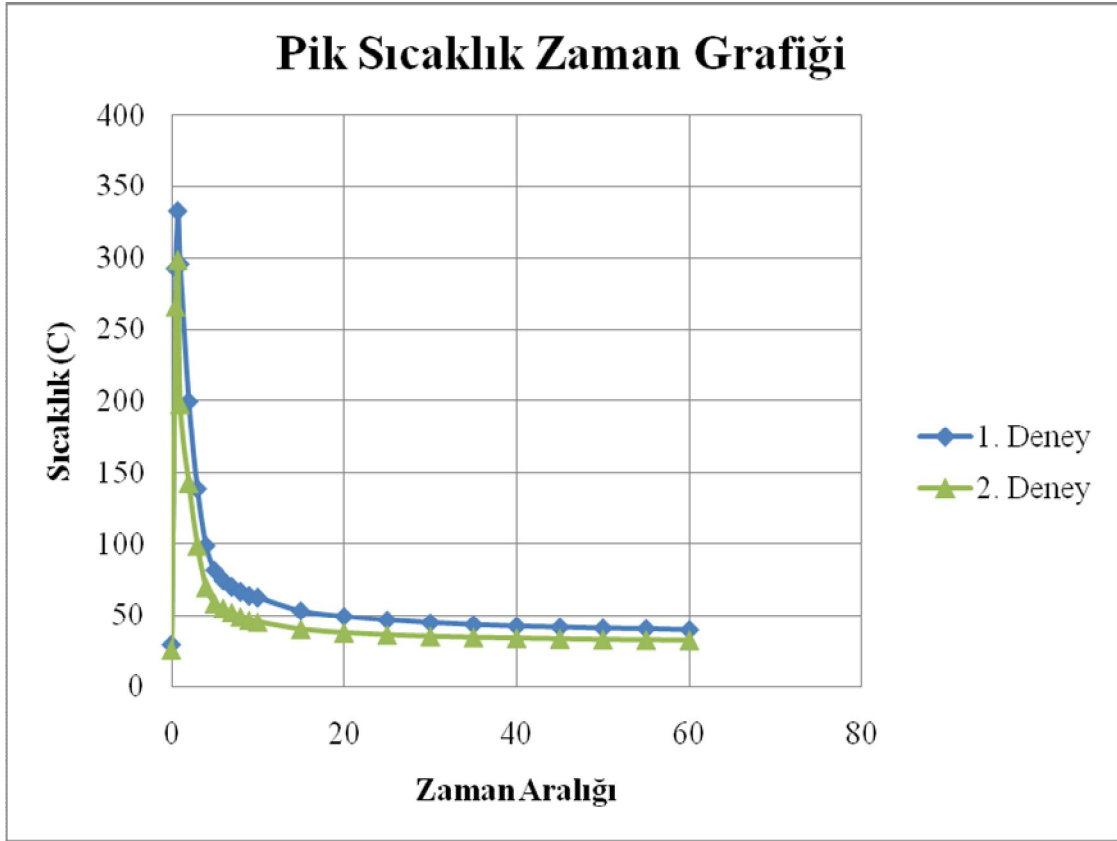
Şekil 4.5. Sıcaklığın ölçüldüğü noktanın gösterilmesi



Şekil 4.6. Kaynatılacak olan numunelerin görünüşü

4.2.2. Deney Sonuçlarının Alınması

Yapılan deney sonrası ölçülmek istenen sıcaklık noktası için video kamera ile termometre üzerindeki değerleri kaynak boyunca ve kaynaktan sonraki soğuma süresince kayıt edilmiştir. Bu kayıt sonrası alınan değerler bilgisayar da belirli zaman aralıklarına bölünerek Tablo 4.1.'de gösterildiği gibi düzenlenmiştir. Burada elde edilmiş olan sonuçlar toplam 1 dakikalık sonuçlardır. Bu kayıt işlemi sırasında ilk 0.3 sn boyunca ark işlemi gerçekleşmektedir. Bu işlemde numune üzerine Denklem 3.8'de belirtildiği gibi akım ve gerilim değerleri verilerek Q ısısı oluşturulmaktadır. Daha sonraki zaman dilimi olan 59.7 sn boyunca ise numune üzerine verilmiş olan Q ısısın oluşturduğu etkiler sonucu sıcaklık değişimleri gözlemlenmiştir. İlk ark verildikten sonra ölçüm noktasının uzak olması sonucu ark sıcaklığının etkisi belirli bir süre gecikmeli olarak gelmektedir. Bu durum karşısında ölçüm yapılan noktada Şekil 4.7. de gösterildiği gibi başlangıçta ortam sıcaklığına göre artış gösteren bir sıcaklık dağılımı vardır.



Şekil 4.7. Pik sıcaklık deneyi sonucu sıcaklık zaman grafiği

Tablo 4.1. Pik sıcaklık deneyi sonucu sıcaklık zaman tablosu

Deney 1		Deney 2		Ortalama Sıcaklıklar		Deneyler Arası Sıcaklık Farkı	
Zaman (sn)	Sıcaklık ($^{\circ}\text{C}$)	Zaman (sn)	Sıcaklık ($^{\circ}\text{C}$)	Zaman (sn)	Sıcaklık ($^{\circ}\text{C}$)	Zaman (sn)	Sıcaklık ($^{\circ}\text{C}$)
0	30	0	26,5	0	28,25	0	3,5
0,5	293	0,5	266	0,5	279,5	0,5	27
0,75	333	0,75	298,9	0,75	315,95	0,75	34,1
1	296	1	198	1	247	1	98
2	199,8	2	143	2	171,4	2	56,8
3	138,9	3	98,9	3	118,9	3	40
4	98,9	4	70	4	84,45	4	28,9
5	81,8	5	59	5	70,4	5	22,8
6	74,5	6	55,4	6	64,95	6	19,1
7	70,1	7	52,5	7	61,3	7	17,6
8	66,8	8	49,5	8	58,15	8	17,3
9	64	9	47,2	9	55,6	9	16,8
10	62,8	10	45,9	10	54,35	10	16,9
15	53,6	15	40,8	15	47,2	15	12,8
20	49,7	20	38,3	20	44	20	11,4
25	47,2	25	36,8	25	42	25	10,4
30	45,3	30	35,8	30	40,55	30	9,5
35	43,9	35	35,1	35	39,5	35	8,8
40	42,8	40	34,5	40	38,65	40	8,3
45	42,1	45	34	45	38,05	45	8,1
50	41,4	50	33,6	50	37,5	50	7,8
55	41	55	33,3	55	37,15	55	7,7
60	40,2	60	33,1	60	36,65	60	7,1
						Ortalama fark	21,3348

4.2.3. Deney Sonuçlarının Yorumlanması

Yapılan 2 numune üzerindeki deney sonrası çizilen Şekil 4.13. deki iki adet eğri için bir analiz yapılmıştır. Bunun sonucu iki adet eğri arasındaki ortalama sıcaklık farkı tespit edilmiştir. Bu sıcaklık farkı ise Tablo 4.1. deki gibidir. Ortalama sıcaklık farkının

fazla olma sebepleri ise ortamdaki sıcaklık değişimleri ve numunelerdeki değişimlerdir. Ayrıca robot tarafından verilen akım değerinin 10 A gibi bir değerde değişmesidir. Bununla birlikte ölçüm aletinin odaklandığı noktanın ortalama 2 mm değişim göstermesi de bu farkı yaratmaktadır.

Genel sonuç itibarıyla ortalama sıcaklık farkı fazla çıkmasına rağmen ısı transferi açısından sıcaklık dağılım grafiklerinin oluşturduğu eğri nominal değerde ve birbiri ile benzer bir eğim göstermektedir.

Ortalama sıcaklık değeri için 2 deney sonucu çıkan ortalama sıcaklık değeri alınarak Excel’de polinomsal denklemi çıkartılmıştır. Bu işlemde $R^2 = 0,585$ değeri ile 5’lik düzende regresyon işlemi yapılmıştır. Denklem 4.1. de gösterildiği gibidir. Aynı denklem mathematica ile eklerde gösterildiği gibi komutlar yardımıyla 5. dereceden denklem olarak Denklem 4.2. deki gibi çıkarılmıştır.

$$T = -0.6 \times 10^{-7} t^5 + 0,0012 t^4 - 0,0809 t^3 + 2,5396 t^2 - 36,039 t + 221,87 \quad (4.1)$$

$$T = -6.53 \times 10^{-6} t^5 + 0.00118 t^4 - 0.08086 t^3 + 2.5396 t^2 - 36.039 t + 221.87 \quad (4.2)$$

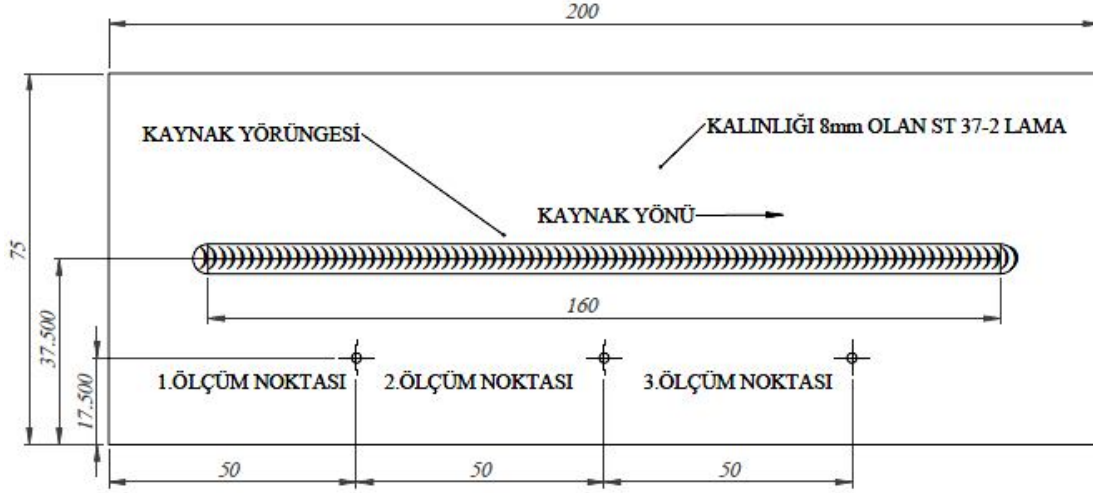
4.3. Hareketli Isı Kaynağı Sıcaklık Deneyi

4.3.1. Deneyin Açıklanması

Kaynak işlemi yapılırken kaynak torcunun hareketine bağlı olarak yapılan doğrusal kaynağın sonucu belirli bir miktar ısı girişi zamana bağlı olarak gerçekleşmektedir. Bunun analiz edilmesi için deneysel bir uygulama yapılmıştır.

Şekil 4.8. gösterildiği gibi 200x75x8 mm ölçülerinde 3 adet numune hazırlanmıştır. Numuneler kaynatılırken 3 farklı noktadan ölçü alınması gerektiği için her kaynatılma işlemini için 3 adet parça kullanılmıştır. İlk ölçüm noktasından sıcaklık alındıktan sonra ikinci ve üçüncü noktalardan da sıra ile sıcaklık değerleri alınmıştır. Her bir nokta için 600 sn bekleme işlemi gerçekleştirilmiştir. Toplam kaynak boyu ise 160

mm olarak robota girilmiş ortalama akım değeri 140 A ve ortalama gerilim değeri ise 24 V olarak sağlanmıştır. Kaynak hızı ise 10 mm/sn olarak belirlenmiştir. Toplam kaynak süresi ise bunun sonucu 16 sn olmaktadır.



Şekil 4.8. Sıcaklığın ölçüldüğü noktaların gösterilmesi

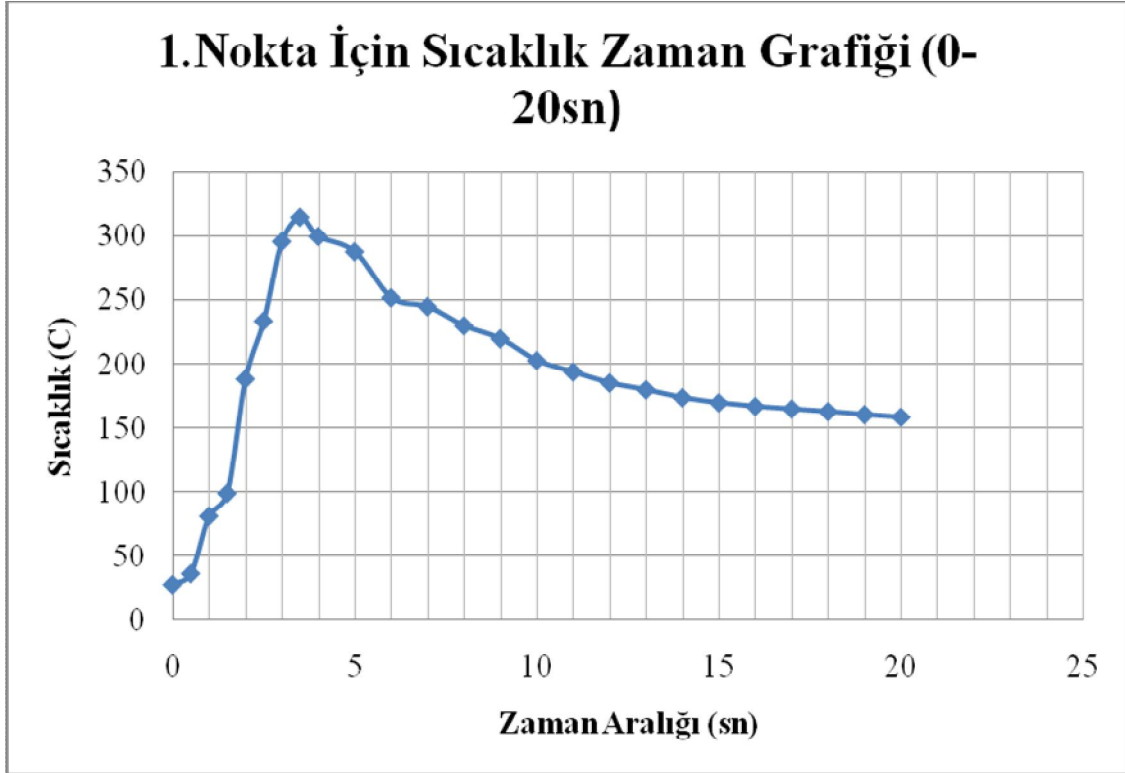
4.3.2. Deney Sonuçlarının Alınması

Bu deney sırasında video kamera ile kaynak başlangıcından itibaren kaynak bitişi ve daha sonraki soğuma süresi takip edilmiştir. Elde edilen veriler saniye olarak zaman dilimleri şeklinde 600 sn boyunca listelendirilmiştir. Öncelikle Şekil 4.8. de gösterilen 1. ölçüm noktası için sıcaklık değeri ölçülmüş daha sonra ise 2. ölçüm noktası ve 3. ölçüm noktası için sıcaklık ölçümleri yapılmıştır. Bu noktalardan aynı anda ölçüm alma imkanı olmadığı için 3 nokta içinde farklı parça üzerinde kaynak işlemi gerçekleştirilip ölçüler bu şekilde tespit edilmiştir. Daha sonra ise tek bir parçadan aynı anda 3 ölçüm yapılmış gibi düşünülüp noktalar için tek bir tablo oluşturulmuştur. Bununla birlikte iki farklı grafikte bu tablo yardımıyla çizilmiştir. Elde edilen veriler doğrultusunda çizilen Şekil 4.9., 4.11. ve 4.13. da kaynak süresi için ilk 20 sn göz önüne alınmıştır. Toplam 600 sn'lik ölçüm süresi için ise Şekil 4.10., 4.12., ve 4.14. çizilmiştir. Sıcaklık değerleri ölçülen 3 noktanın verileri daha sonra Şekil 4.15. ve 4.16. da gösterildiği gibi tek bir parçadan bir seferde ölçülmüş sıcaklık değerleri gibi düşünülerek çizilmiştir.

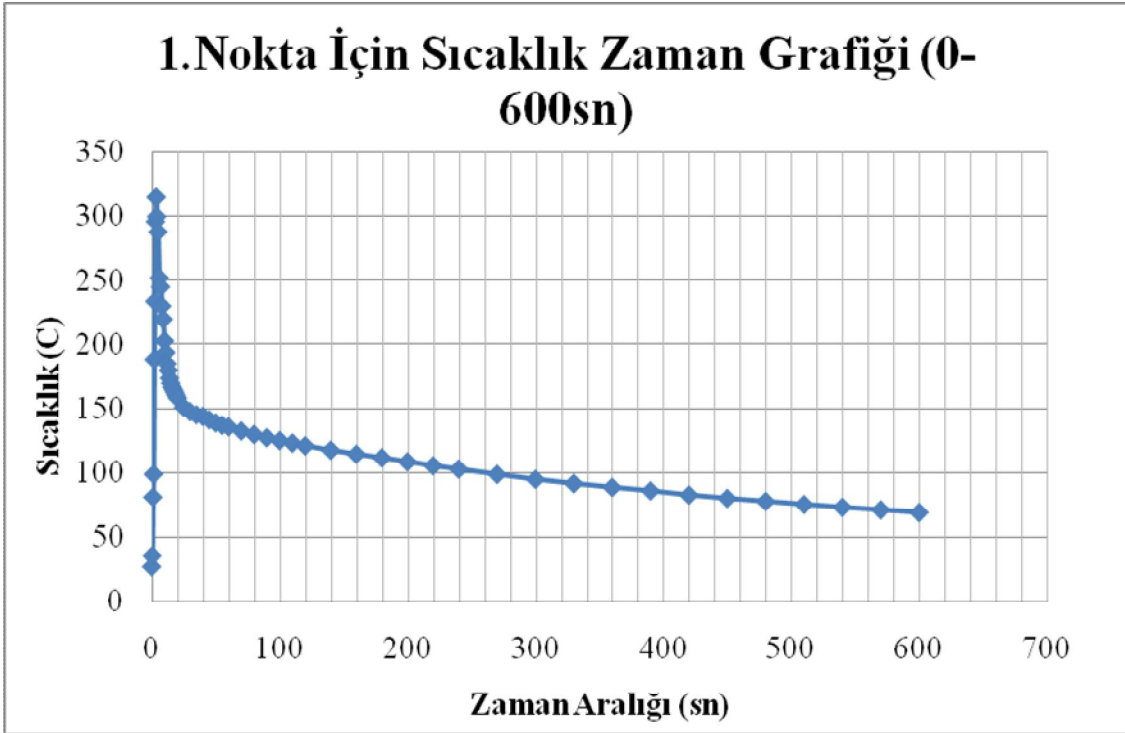
Tablo 4.2. Hareketli ısı kaynağı sonucu oluşan sıcaklık değerlerinin gösterilmesi

1.Ölçüm Nok.		2.Ölçüm Nok.		3.Ölçüm Nok.	
Zaman (sn)	Sıc. ($^{\circ}\text{C}$)	Zaman (sn)	Sıc. ($^{\circ}\text{C}$)	Zaman (sn)	Sıc. ($^{\circ}\text{C}$)
0	27,3	0	30,6	0	28
0,5	35,9	0,5	30,8	0,5	28
1	80,9	1	31,9	1	28,8
2	188,3	2	31,3	2	28,3
3	296	3	31,5	3	28,3
4	300	4	32,4	4	28,2
5	288	5	36,8	5	28,3
6	252	6	68,2	6	28,5
7	245	7	290	7	28,6
8	230	8	259	8	29,2
9	219,8	9	249	9	30,1
10	202,8	10	228,8	10	36,1
11	193,8	11	198,6	11	137,8
12	185,2	12	190,8	12	284,3
13	179,9	13	183,9	13	269,3
14	173,7	14	177,9	14	258,9
15	169,7	15	173,8	15	228,9
16	166,8	16	171,9	16	209,8
17	164,8	17	169,1	17	192,9
18	162,8	18	167,2	18	185,8
19	160,5	19	165,4	19	179,8
20	158,4	20	162,8	20	175,2
25	151,2	25	156,5	25	161,8
30	147,6	30	152,2	30	151
35	145,2	35	150	35	144,4
40	144	40	148,6	40	139,9
45	141,3	45	147,4	45	136,6
50	138,9	50	146,2	50	134
55	137	55	145,4	55	131,9
60	135,8	60	144,3	60	129,8
70	132,5	70	142,1	70	126,7
80	129,8	80	139,7	80	124,1
90	127,3	90	136,8	90	121,7

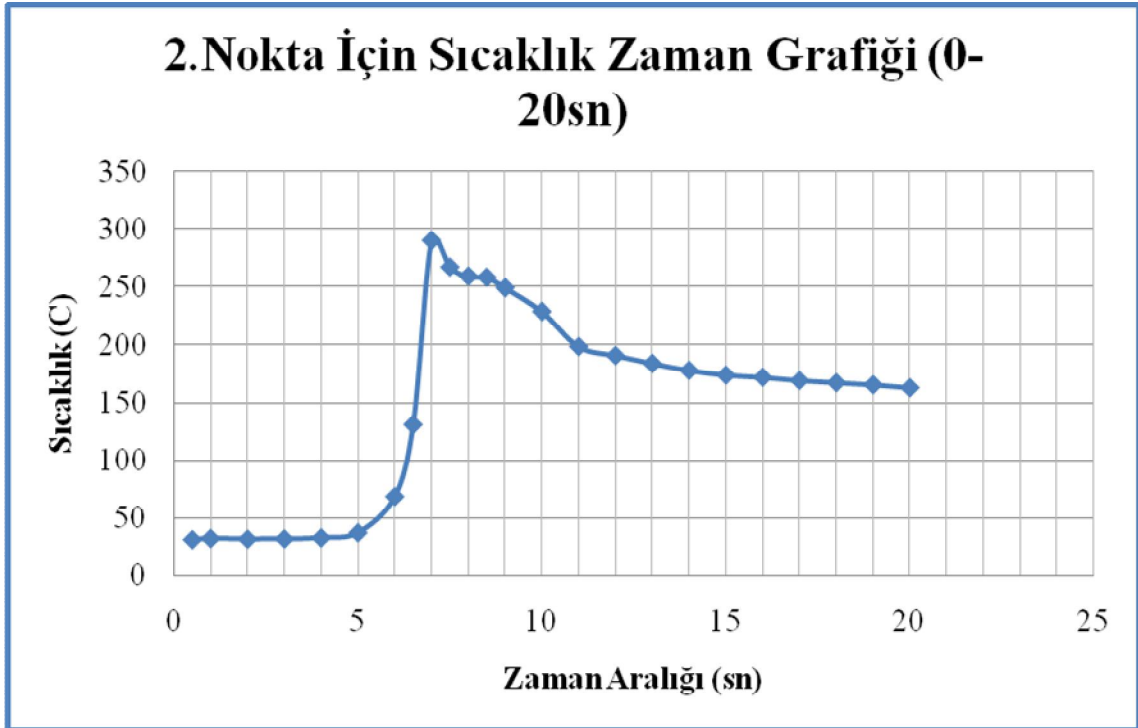
100	125,1	100	134	100	119,6
110	123,1	110	131,3	110	117,7
120	121	120	125,8	120	115,9
140	117,5	140	120,8	140	112,9
160	114,4	160	116,6	160	108,8
180	111,6	180	112,4	180	105,4
200	108,5	200	107,3	200	101,9
220	105,4	220	103,7	220	98,7
240	102,8	240	98,9	240	95,8
270	98,7	270	94,6	270	92
300	94,8	300	91,1	300	88,4
330	91,5	330	87,5	330	85
360	88,5	360	84,7	360	81,8
390	85,8	390	81,2	390	79,3
420	82,5	420	78,5	420	76,7
450	79,9	450	75,7	450	74,4
480	77,6	480	73,6	480	72,4
510	75,2	510	71,5	510	70,6
540	73	540	69,8	540	68,8
570	71	570	68,6	570	67,2
600	69	600	65	600	65,6



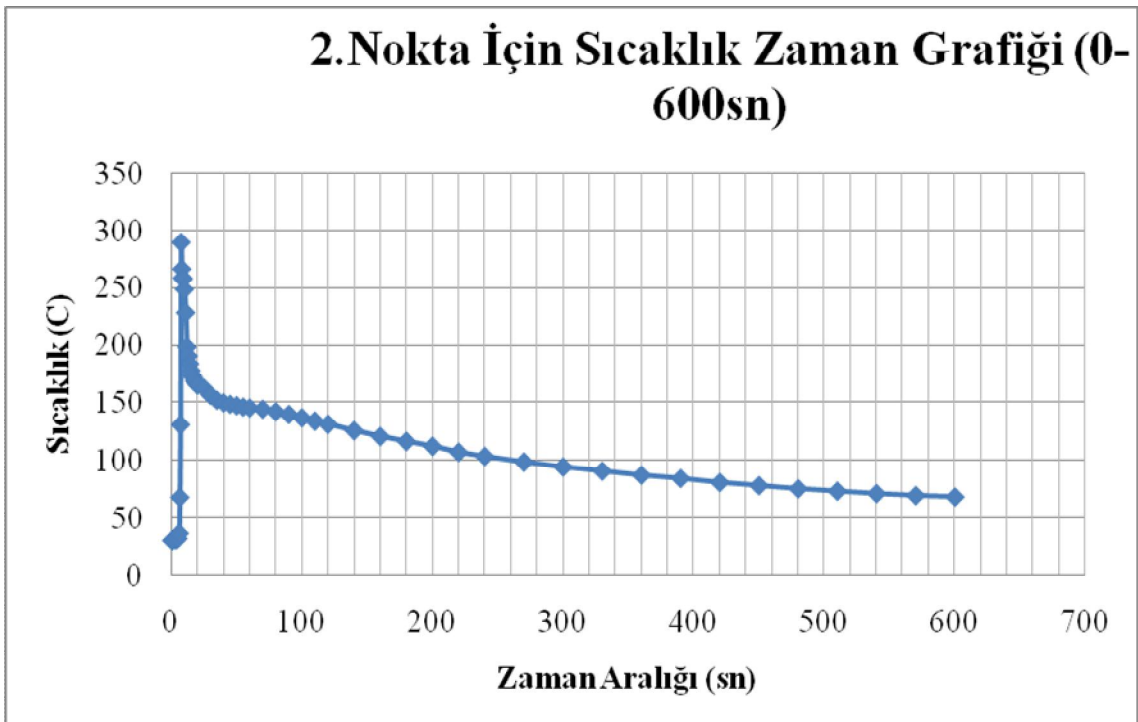
Şekil 4.9. 1.Ölçüm noktası 0-20 sn aralığı ölçüm değerleri



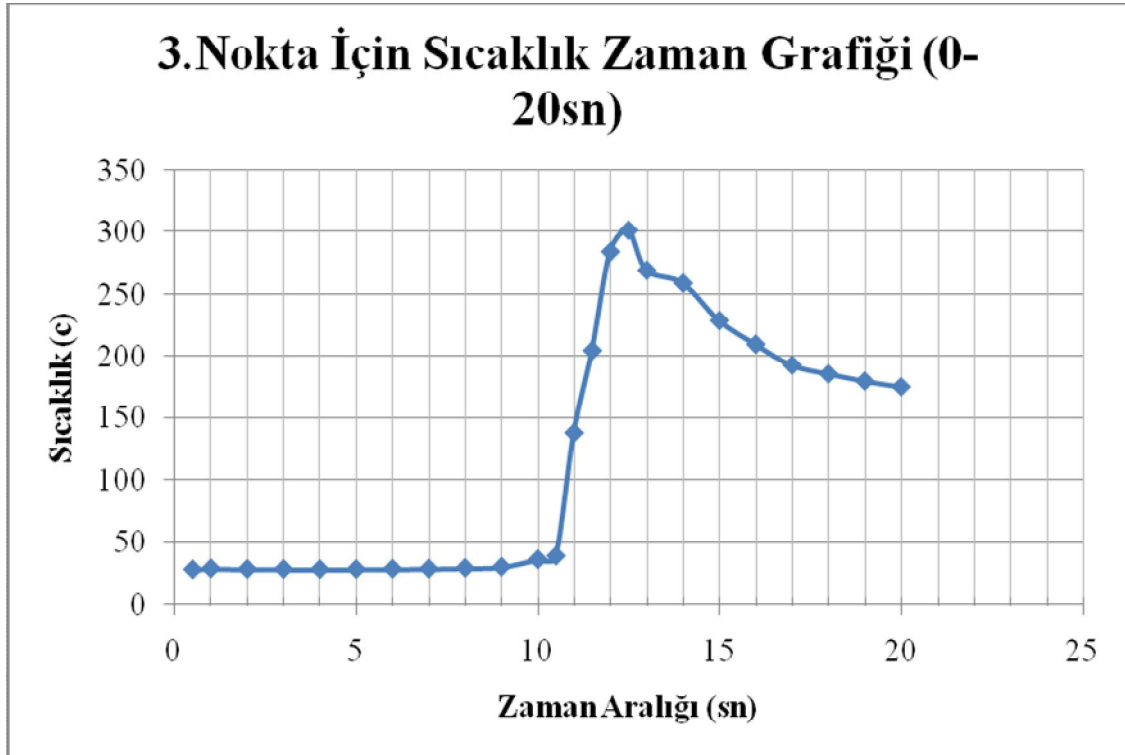
Şekil 4.10. 1.Ölçüm noktası 0-600 sn aralığı ölçüm değerleri



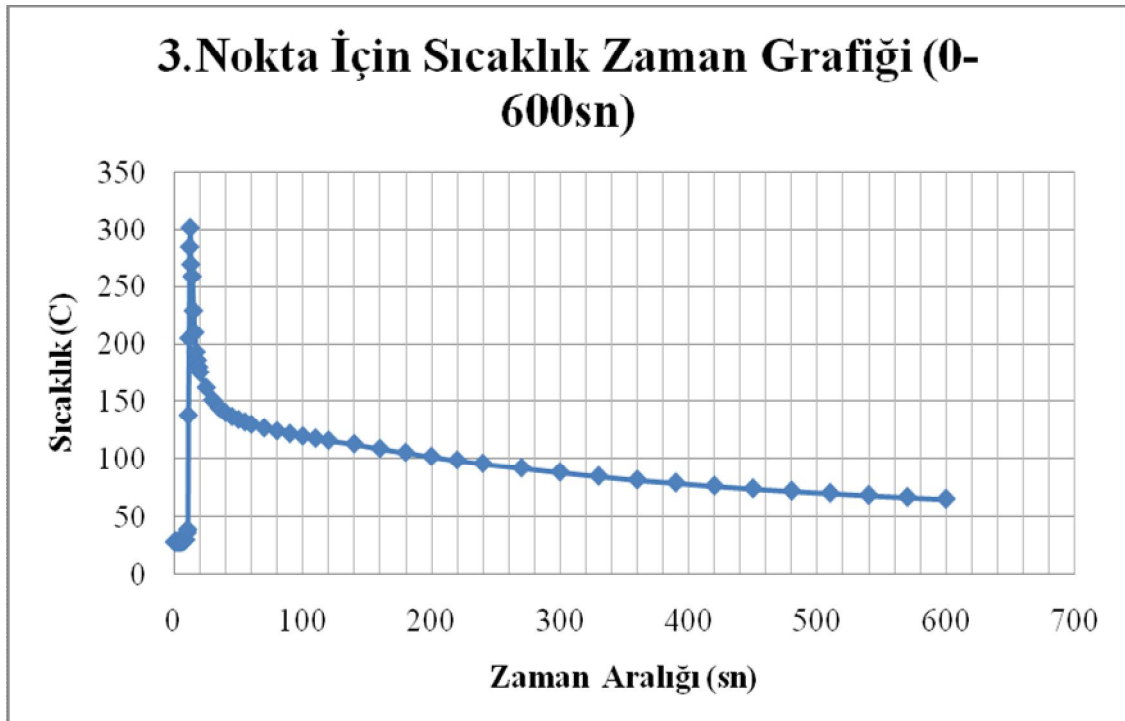
Şekil 4.11. 2.Ölçüm noktası 0-20 sn aralığı ölçüm değerleri



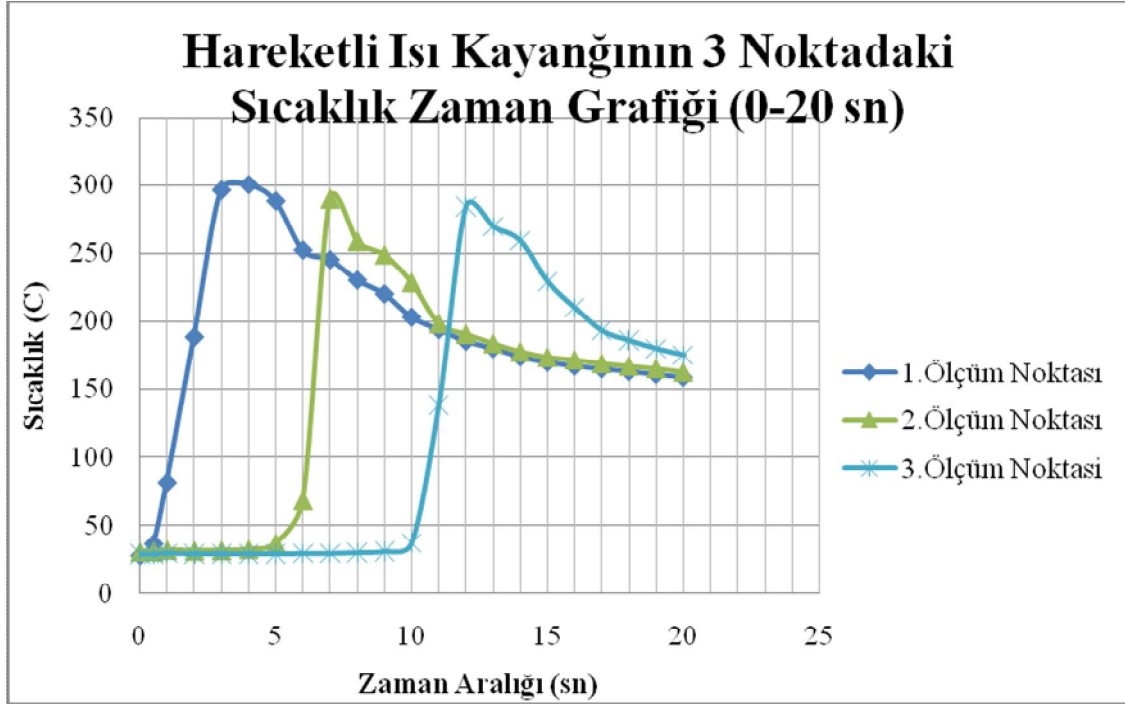
Şekil 4.12. 2.Ölçüm noktası 0-600 sn aralığı ölçüm değerleri



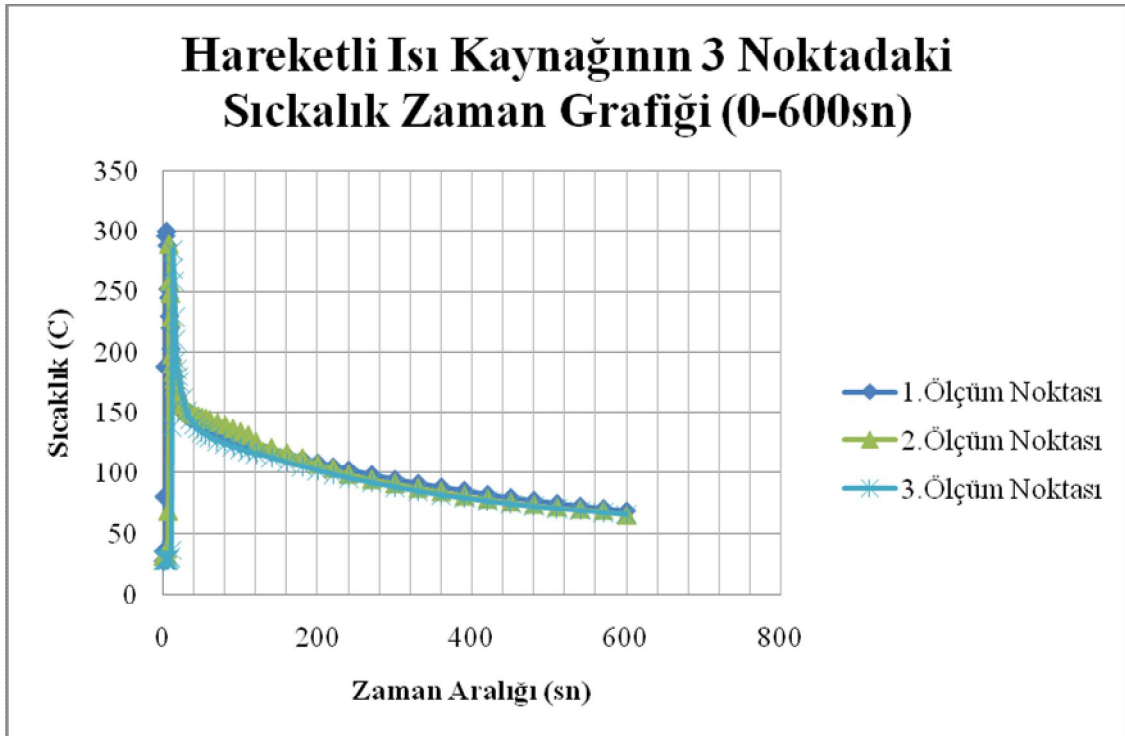
Şekil 4.13. 3.Ölçüm noktası 0-20 sn aralığı ölçüm değerleri



Şekil 4.14. 3.Ölçüm noktası 0-600 sn aralığı ölçüm değerleri



Şekil 4.15. Hareketli ısı kaynağının 3 noktadaki sıcaklıklarının tek bir grafikte gösterimi



Şekil 4.16. Hareketli ısı kaynağının 3 noktadaki sıcaklıklarının tek bir grafikte gösterimi

4.3.3. Deney Sonuçlarının Yorumlanması

Deney sonuçları kayıt edilip veri olarak işlendikten sonra çizilen grafikler yorumlanarak deneysel sonuçlar elde edilmiştir. Bunların başında ölçümü alınan 3 noktanın da Şekil 4.8. de gösterildiği gibi kaynak dikişine olan uzaklıklarına bağlı olarak oluşturdukları sıcaklık verilerinin bir biri ile olan etkisidir. Özellikle kaynak dikişinin ölçüm noktalarına y eksenı boyunca olan uzaklıkları sonucu ölçülen en yüksek sıcaklık değerleri birbirine yakın çıkmıştır. Bunun dışında x eksenı boyunca sıcaklık ölçüm noktalarının kaynak dikişine uzaklıkları değişken olduğu için en yüksek sıcaklık değeri öncelikle 1. ölçüm noktasında gözlemlenmiştir. Daha sonra ise sırasıyla 2. ve 3. ölçüm noktalarının gözlemlenmiştir.

Yapılan deneyde 2. ve 3. sıcaklık ölçüm noktasında gözlemlenen en yüksek sıcaklık değeri 1. sıcaklık ölçüm noktasındaki değerin gerçekleşmesine bağlı olarak belirli süre frekansı ile gözlemlenmiştir. Bunun sonucu kaynak esnasında sabit bir hızdaki torçdan numune parça üzerine gelen ısı ile oluşmuş olan ısı yayılımı sabit bir rejim ile parça üzerinde dağılmaktadır. Hareketli ısı kaynağı ile oluşan ısı yayılımı teorisi gereği x eksenı ve y ekseninde meydana gelen atomik düzeydeki ısı transferi sonucu deneyde gözlemlenmektedir.

Numune parça zaman bağlı olarak ortamdaki taşınım, ısınım ve bağlı olduğu madde üzerindeki iletimsel ısı transferi gibi etkiler sonucu soğuma göstermiştir. Sıcaklık ölçümü alınan 3 adet ölçüm noktası içinde kaynaktan sonraki süreçte meydana gelen bu soğuma işlemi ile soğuma eğrilerin oluşmuştur. Ayrıca hareketli ısı kaynağı teori sonucu sıra ile ortam sıcaklığına ulaşmaktadır. Buradaki ortam sıcaklığına ulaşma esnasında ortam sıcaklığı ile parça dengeye gelene kadar ki devir de geçen süre sonucu ölçüm noktalarındaki sıcaklık bir değerinin aynı olması gerekmektedir.

Her üç nokta içinde sıcaklığın kaynak dikişinden 20 mm uzaklıktaki değeri için zamanla değişim denklemleri EXCEL 'de ve Mathematica'da çıkartılmıştır. Bu değerler için regresyon tanımlılık terimleri ise EXCEL de bulunmuştur. Bununla

birlikte 0 ile 600 sn aralıktaki sıcaklık değişimi içinde EXCEL de denklemler çıkartılmıştır. (Tablo 4.3)

Tablo 4.3. Ölçüm noktalarının farklı sıcaklıklar için denklemleri

1.Ölçüm Noktası	0-600sn için	$T = -1 \times 10^{-11} t^5 + 3 \times 10^{-8} t^4 - 2 \times 10^{-5} t^3 + 0,0068 t^2 - 1,1923 t + 192,63$ $R^2 = 0,445$
2.Ölçüm Noktası	0-600sn için	$T = -1 \times 10^{-12} t^6 + 2 \times 10^{-9} t^5 - 1 \times 10^{-6} t^4 + 0,0005 t^3 - 0,0727 t^2 + 4,2033 t + 99,242$ $R^2 = 0,327$
3.Ölçüm Noktası	0-600sn için	$T = -1 \times 10^{-12} t^6 + 3 \times 10^{-9} t^5 - 2 \times 10^{-6} t^4 + 0,0007 t^3 - 0,1022 t^2 + 6,1534 t + 54,26$ $R^2 = 0,334$
1.Ölçüm Noktası	0-20sn için	$T = 0,0011 t^5 - 0,0847 t^4 + 2,3929 t^3 - 30,565 t^2 + 161,55 t - 12,867$ $R^2 = 0,935$
2.Ölçüm Noktası	0-20sn için	$T = -0,0035 t^5 + 0,2111 t^4 - 4,4702 t^3 + 38,405 t^2 - 96,057 t + 64,165$ $R^2 = 0,806$
3.Ölçüm Noktası	0-20sn için	$T = 0,0059 t^5 - 0,3028 t^4 + 5,2601 t^3 - 34,629 t^2 + 75,274 t + 3,3781$ $R^2 = 0,887$
Mathematica ile 1.Ölçüm Noktası	0-20sn için	$T = -1.47314 \times 10^{-6} t^9 + 0.000148323 t^8 - 0.00632898 t^7 + 0.148648 t^6 - 2.08474 t^5 + 17.6339 t^4 - 85.3152 t^3 + 196.921 t^2 - 78.2196 t + 30.0143$
Mathematica ile 1.Ölçüm Noktası	0-20sn için	$T = +1.9106 \times 10^{-22} t^{20} - 1.17879 \times 10^{-8} t^{11} + 4.23407 \times 10^{-7} t^{10} - 0.00909157 t^7 + 0.296617 t^6 - 4.12272 t^5 + 29.2128 t^4 - 104.303 t^3 + 167.866 t^2 - 89.4272 t + 34.5367$
Mathematica ile 1.Ölçüm Noktası	0-20sn için	$T = +2.47844 \times 10^{-22} t^{21} - 2.00737 \times 10^{-14} t^{16} + 2.2067 \times 10^{-11} t^{14} - 0.0000492442 t^{10} + 0.00275912 t^9 - 0.0695728 t^8 + 1.00782 t^7 - 9.03282 t^6 + 50.8199 t^5 - 175.27 t^4 + 347.134 t^3 - 344.614 t^2 + 124.12 t + 26.045$

5. DENEYSEL MODELİN ANSYS İLE ANALİZ EDİLMESİ

Günümüzde birçok kaynak uygulamasında ısının tesiri altındaki bölgenin ve kaynak edilen malzemedeki ısı enerjisi girdisinin kaynak kalitesine etkileri söz konusu olmaktadır. Kaynak işlemi sırasında kaynak bölgesi üzerindeki sıcaklık dağılımları kaynağın yapılmasına bağlı olarak ihtiyaçlar doğrultusunda belirlenmesi gerekebilmektedir. Bu sebeple bir önceki bölümde yapılan deneysel kaynak uygulamaları ile ilgili olarak bir malzeme üzerindeki kaynak işlemi sırasındaki sıcaklık dağılımları sonlu elemanlar yöntemi ile bilgisayar üzerinde analiz edilmektedir.

SEA sonlu eleman analizi için ANSYS Multiphysics programından yararlanılmaktadır. Deney için yapılmış olan iki adet uygulama ANSYS ile tekrar gerçekleştirilecektir. Bunlar pik sıcaklığın ısı dağılımı ile kaynağın doğrusal hareketi sonucu oluşturduğu ısı dağılımıdır. Bu analizlerin bilgisayar ortamında yapılmasına geçmeden önce ANSYS ile analiz için analiz türünün ve prosedürlerin belirlenmesi gerekmektedir.

Genelde ANSYS ile statik ve termal analizler gerçekleştirilmekte olup bunlar sürekli sabit durum ile geçişli zamana bağlı değişken durum için diye ikiye ayrılmaktadır. Bu çalışmada termal analiz işleminin geçişli zamana bağlı değişken durum analiz işlemi tercih edilmiştir. Kaynak etkisi altındaki bölgenin almış olduğu ısıya bağlı olarak zamanla soğuma göstermesi, incelenmek istendiği için bu analiz yöntemi tercih edilmiştir. Bu kapsamda sıcaklık yayılımı, ısı akısı miktarı, ısının graydanları, ısının kazanımı ve ısının kaybı hesaplanmaktadır. Buna ilave olarak malzeme özelliklerinin sıcaklık ile değişimi sonucu analizde lineer olmayan çözümleme yapılacaktır.

Analiz prosedürü olarak öncelikle birim sistemi seçilmesi gerekmektedir. Bundan sonra ise analiz edilecek problem belirlenir ve SEA analizleri için kullanılan geometrik modelin tanıtılması, malzeme özelliklerinin belirlenmesi, ağ yapısının oluşturulması, uygulanacak sınır şartlar ile yüklerin girilmesi, girilen değerlerin

çözümlemlenmesi ve en son elde edilen çözüm sonuçlarının analiz edilmesi söz konusu olur.

Analizde kullanılan ortak noktalardan biri olan birim sistemi için ise MKS birim sistemi ve Celcius sıcaklık birimi tercih edilmiştir. Tüm girilen datalar bu birim sistemine göre çevrilip giriş bilgisi olarak girilmiştir. Giriş bilgisi şeklindeki tüm veriler ve yükler ile çözüm bilgileri ise ekte ANSYS komut sistemi şeklinde gösterilmiştir.

5.1. Noktasal Pik Sıcaklığı için Analiz İşlemi

5.1.1. Problemin Belirlenmesi

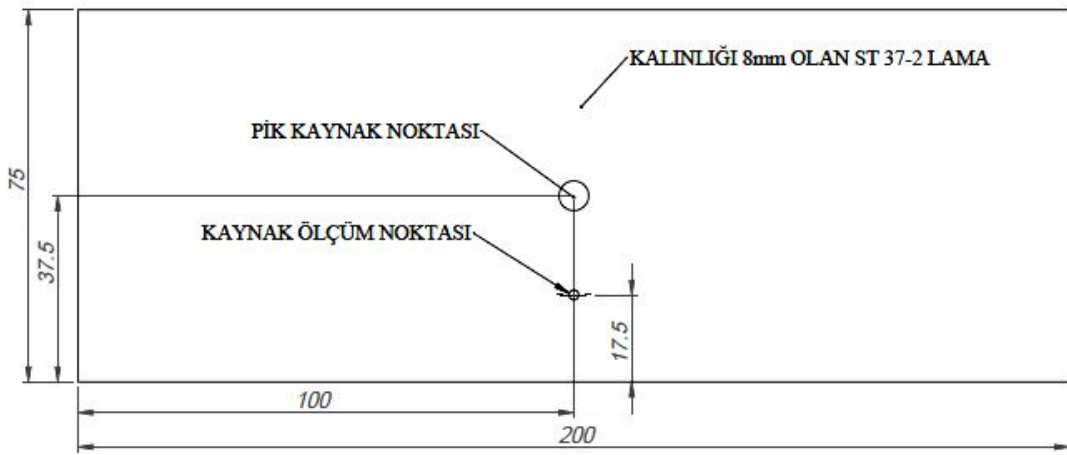
Şekil 5.1 de gösterilen St37 lama malzemeye 0,3 sn süre ile kaynak makinesinin kaynak torç ucunun sabit noktasal teması söz konusudur. Bu temas sonucu MAG kaynak yöntemi ile Fronius Transsinerjik 4000 kaynak makinesi kullanılmaktadır. Kaynak işlemi sırasında 180 A akım çekilmekte ve 24 V kaynak makinesi voltaj gerilimi uygulamaktadır.

4. Bölümde yapılan deneysel çalışmada kullanılan numuneye göre çizilmiş olan Şekil 5.1. deki teknik resim ölçülerinde kaynak ölçüm noktasının pik kaynak noktasına uzaklığı 20 mm dir. Simetri koşulu sebebiyle pik sıcaklığının herhangi 20 mm uzaklıktaki sıcaklık dağılımları aynı olacaktır. Dairesel simetri koşulu vardır. Bu sebeple analiz 2 boyutlu olarak da yan yüzeyden kesit alınarak yapılabilinmektedir. Bu çalışmada ise bu şekilde bir kesit yerine daha sağlıklı olması açısından 3 boyutlu bir katı model ele alınmıştır.

5.1.2. Geometrik Modelin Oluşturulması

Öncelikle ANSYS üzerinde 200x75x8mm ölçülerinde bir adet dikdörtgen prizma çizilmektedir. (Şekil 5.2.) Ağ yapısının ark kaynak noktasında iyi istenmesinden dolayı Şekil 5.3. gösterildiği gibi iç içe geçmiş iki adet dikdörtgen prizma çizilmiştir. Burada dikdörtgenler prizmasından içteki dikdörtgen prizmanın ağ

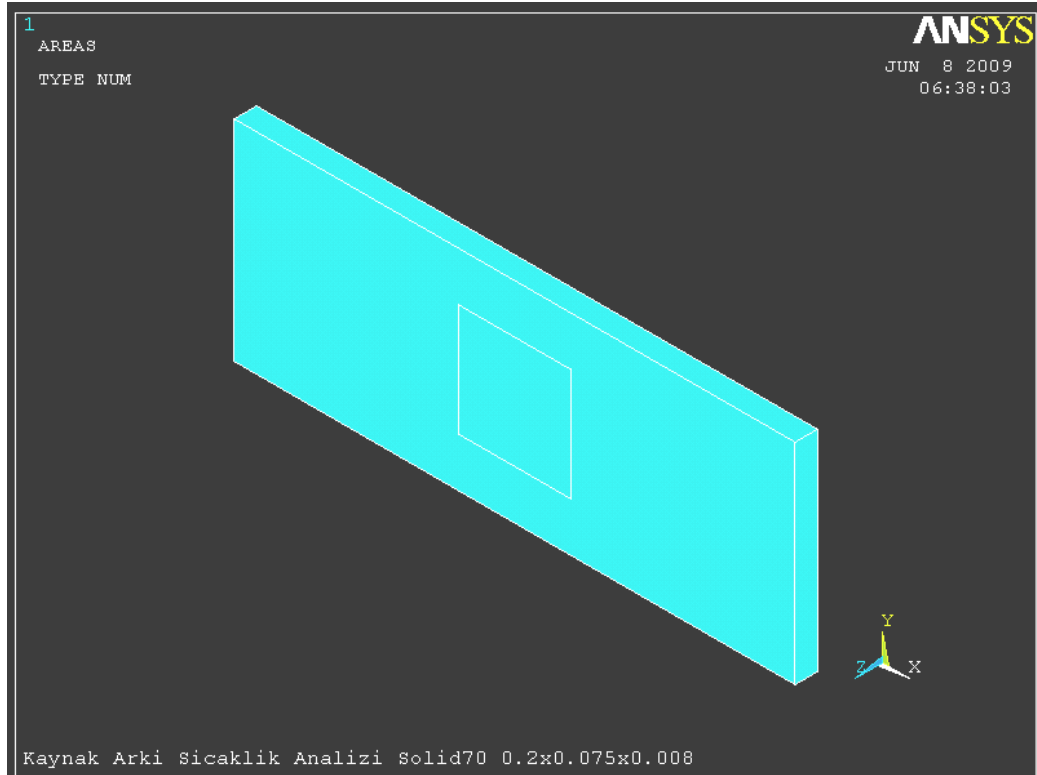
yapısı daha düşük boyutlu olması sağlanmıştır. Bunun sebebi ise kare dizilimli bir ağ yapısı ile malzeme üzerinde sıcaklığın alınmak istendiği uzaklık kolay tespit edilecektir. Ark noktasının bulunduğu bölgedeki ağ yapısı sık olduğu için sonuçlar da daha doğru olacaktır. Dikdörtgenler arasında ANSYS “Glue” komutu ile birbirine birleştirmeler yapılmıştır. Bu sayede herhangi iki madde gibi ANSYS parçayı tanımayıp tek bir parçaymış gibi görmesi sağlanmıştır.



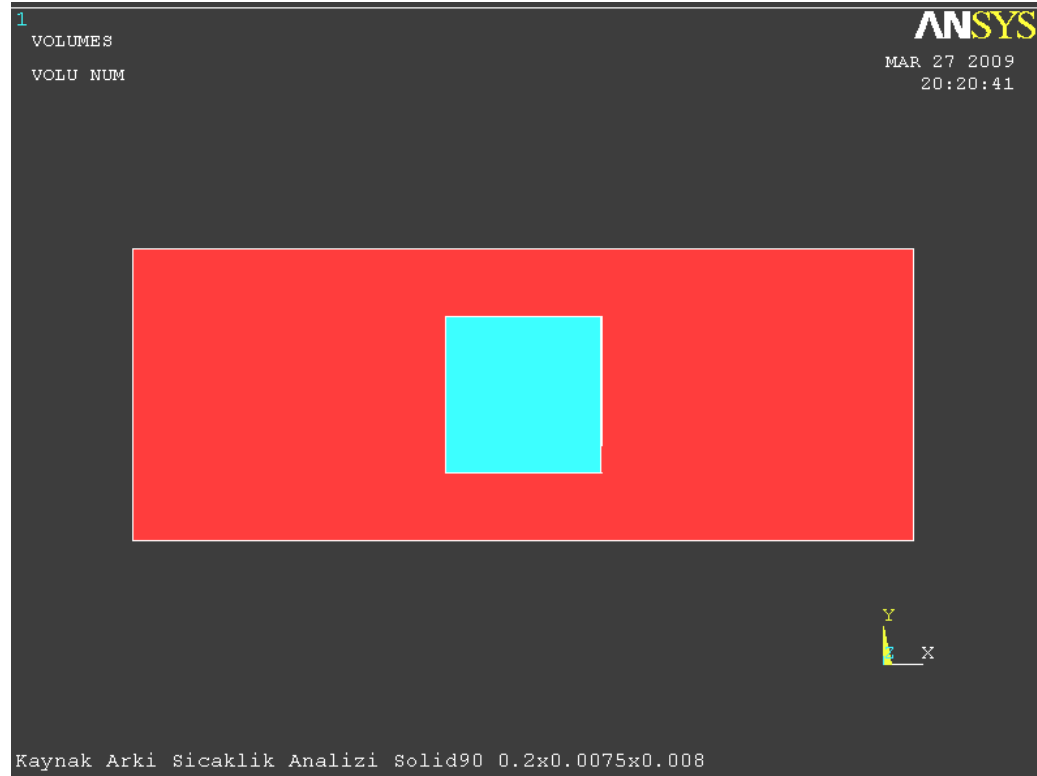
Şekil 5.1. St37-2 malzemesinin sıcaklık ölçüm noktası ve kaynak noktasının gösterilmesi

5.1.3. Malzeme Özelliklerinin Girilmesi

Analizde kullanılan malzemenin termal özelliği deneyde kullanılan numune malzemenin ki ile aynıdır. Zuheir Barsoum'un doktora tezinde kullanılmış olan St37 malzemesi için sıcaklığa bağlı olarak ısı iletim katsayısı ve özgül ısı tablo yapılmıştır. (Tablo 5.1.) (Barsoum, Z., 2008) Sıcaklığa bağlı olarak termal özelliklerin girilmesinin sebebi ise sıcaklık sonucu ısı yayılım katsayısının değişkenlik göstermesidir. Bunun için farklı sıcaklıklardaki malzemenin termal özelliklerinin girilmesi gerekmektedir. Malzeme yoğunluk değeri ise sıcaklığa bağlı olarak girilmeyip standart oda sıcaklığına göre olan değer girilmiştir.



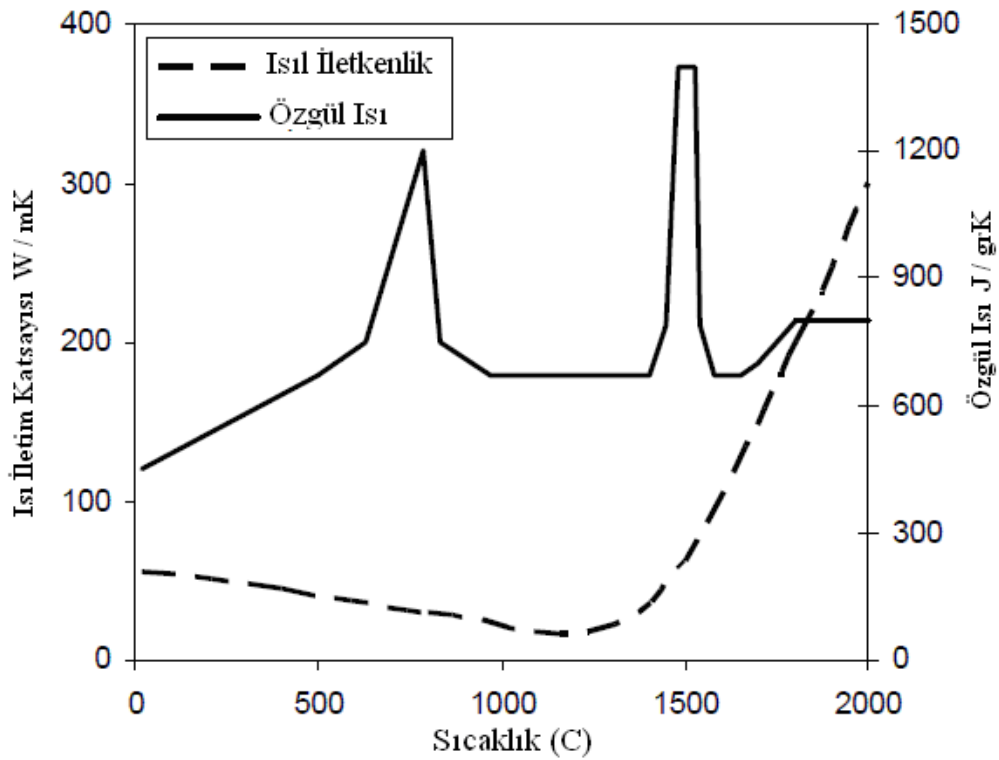
Şekil 5.2. Deneyde kullanılan numunenin Ansys üzerindeki geometrik tasarımı



Şekil 5.3. Ansys üzerindeki analizin iyi olması için geometrik tasarımın biçimlendirilmesi

Sıcaklık değerine bağlı olarak girilen malzeme özellikleri için sıcaklık aralıkları 250°C olarak seçilmiştir. Bunun sebebi analiz işlemi gerçekleşirken yakınsama hatalarının ortadan kaldırılması olmuştur. Sıcaklık aralıkları daha düşük tutulduğunda ANSYS de yapılan analiz lineer olmayan durum için yakınsama yapmamaktadır.

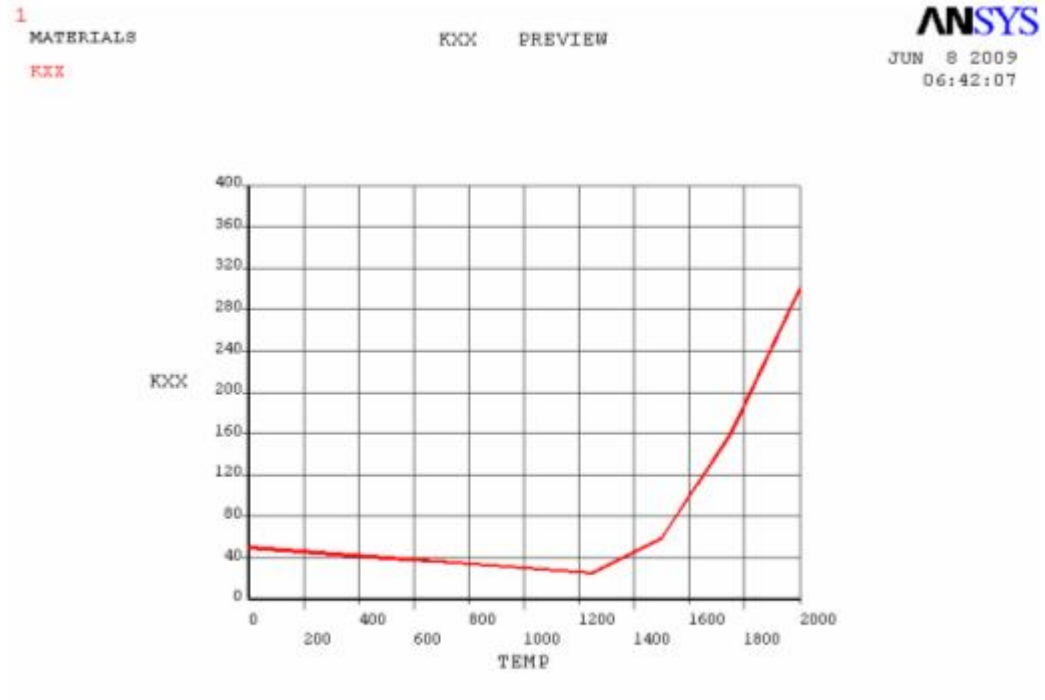
Isı iletim katsayısı ve özgül ısı değeri için Tablo 5.1. deki veriler ANSYS *Material Define* komutu ile tanımlandıktan sonra Şekil 5.5. ve Şekil 5.6. gösterildiği gibi sıcaklığa bağlı grafiği çizilmiştir.



Şekil 5.4. St37 Malzemenin yoğunluğu ve sıcaklığa bağlı termal özellikleri (Zuheir Barsoum)

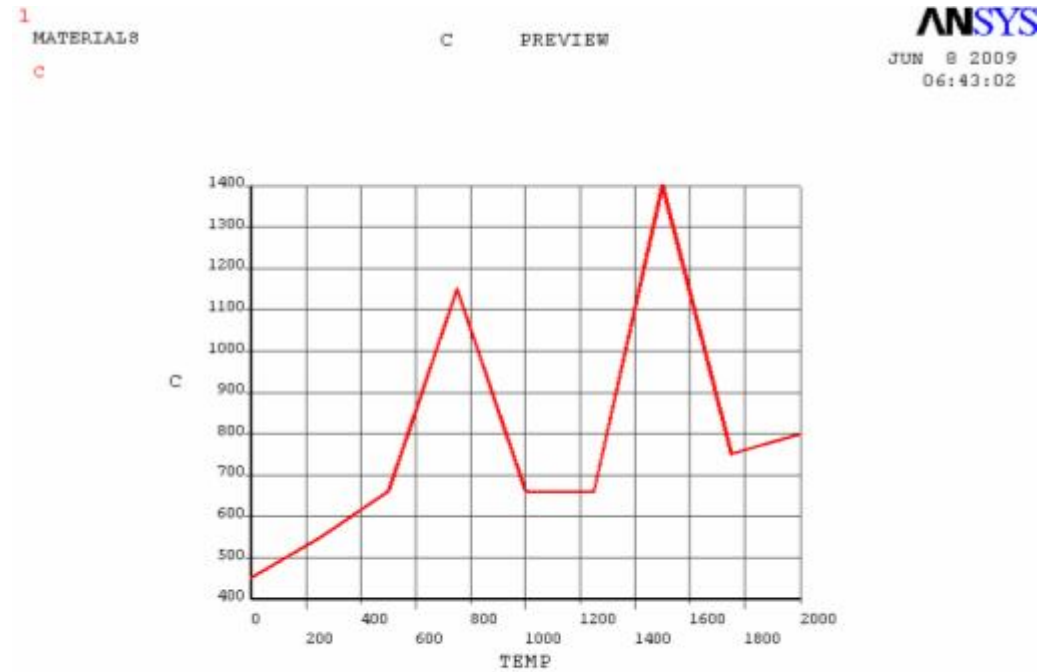
Tablo 5.1. St37 Malzemenin yoğunluğu ve sıcaklığa bağlı termal özellikleri
(Zuheir Barsoum)

Yoğunluk Değeri kg/m^3	7850
Isı İletim Katsayısı W / mK	Sıcaklık ($^{\circ}\text{C}$)
50	0
45	250
40	500
35	750
30	1000
25	1250
60	1500
160	1750
300	2000
Özgül Isı J / grK	Sıcaklık ($^{\circ}\text{C}$)
450	0
550	250
660	500
1150	750
660	1000
660	1250
1400	1500
750	1750
800	2000



Kaynak Arki Sıcaklık Analizi Solid70 0.2x0.075x0.008

Şekil 5.5. St-37 malzeme için ısı iletim katsayısının grafiksel gösterimi



Kaynak Arki Sıcaklık Analizi Solid70 0.2x0.075x0.008

Şekil 5.6. St-37 malzeme için özgül ısının grafiksel gösterimi

5.1.4. Ağ Yapısının Oluşturulması

Ağ yapısının oluşturulması için öncelikle ağ yapısında uygun olan element tipinin belirlenmesi gerekmektedir. Ek Açıklamalarda ANSYS üzerinde kullanılan termal katı element tiplerinden SOLID90 ve SOLID70 için düğüm noktaları gösterilmiştir. Bu iki element tipi de termal analiz için uygun olmasına rağmen farklılıklar göstermektedir. İki element tipine göre pik sıcaklık analizi deneyi yapılmış olup sıcaklık farklılıklarının ne kadar çıktığı incelenmiş ayrıca süre açısından hangi element tipi daha hızlı sonuç vermektedir analiz yapılmıştır. Bunlardan SOLID90 da toplam hacimsel düğüm noktası 20 dir. SOLID70 ise 8 adet düğüm noktası vardır. Yapılan analiz sonrası her iki element için çıkan sıcaklıklar tablolar ile gösterilmiştir. (Tablo 5.2.), (Tablo 5.3.) Analiz sonuçlarının hassas olması amacıyla SOLID90 kullanımı daha uygun olacaktır. Toplam element sayısı SOLID70 için 25424 ve düğüm nokta sayısı 11846 dir. SOLID90 da ise bu sayılar sırasıyla 25385 element sayısı ve 58436 düğüm noktasıdır. SOLID90 kullanılması durumunda hesaplamalarda toplam element sayısı az olup bağlantı noktaları daha fazla olacaktır. Bu işlem sonucunda da bilgisayarın analizi daha yavaş gerçekleştirecektir.

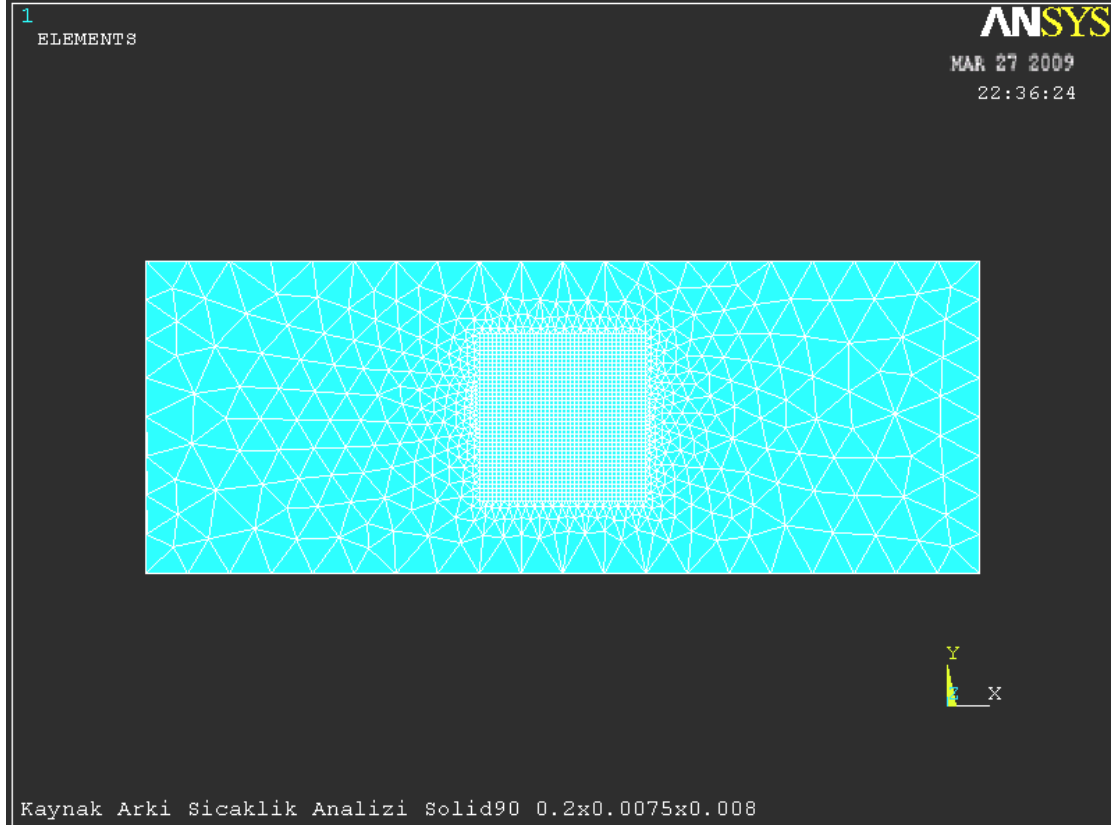
Analizin hızlı olması amacıyla seçilmiş olan SOLID70 için oluşturulan ağ yapısında içteki dikdörtgen prizmaya uygulanan element boyutu 0.001m olarak dıştaki dikdörtgen prizma uygulanan element boyut ise 0.01m olarak belirlenmiştir. (Şekil 5.7.)

Tablo 5.2. Ansys ile yapılan analiz sonucu SOLID90 element tipi için ark noktasına belirli uzaklıktaki sıcaklıkların zamanla değişimleri

***** ANSYS POST26 VARIABLE LISTING *****					
TIME	5mm_Uz	10mm_Uza	15mm_Uza	20mm_Uza	22.5mm_U
	ta_Nokta	ka_Nokt	ka_Nokt	ka_Nokt	zaka_No
0.10000E-01	30.0000	30.0000	30.0000	30.0000	30.0000
0.29333E-01	45.2393	30.0099	30.0000	30.0000	30.0000
0.47333E-01	83.3232	30.0198	30.0000	30.0000	30.0000
0.65333E-01	131.562	30.0370	30.0000	30.0000	30.0000
0.83333E-01	176.373	30.0759	30.0000	30.0000	30.0000
0.10133	238.344	30.1467	30.0000	30.0000	30.0000
0.11933	297.432	30.2686	30.0001	30.0000	30.0000
0.13733	353.113	30.4605	30.0002	30.0000	30.0000
0.15533	403.133	30.7406	30.0004	30.0000	30.0000
0.17333	453.654	31.1232	30.0009	30.0000	30.0000
0.19533	510.056	31.7675	30.0020	30.0000	30.0000
0.21733	561.785	32.6052	30.0041	30.0000	30.0000
0.23933	609.126	33.6469	30.0077	30.0000	30.0000
0.26133	654.168	34.8966	30.0135	30.0000	30.0000
0.27933	712.421	36.0589	30.0201	30.0000	30.0000
0.28967	757.117	36.7722	30.0246	30.0000	30.0000
0.30000	807.874	37.5309	30.0299	30.0000	30.0000
1.2700	540.513	94.5279	41.2346	32.3067	30.6747
2.0200	333.790	109.437	50.3540	35.2636	31.7501
2.7700	228.544	109.415	57.1648	38.6391	33.2755
3.5200	173.833	104.331	61.3836	41.8110	35.0274
4.2700	142.676	98.2093	63.5678	44.4584	36.7925
5.0252	122.912	92.3078	64.3542	46.5028	38.4337
6.0813	105.610	85.2247	63.9365	48.3001	40.2998
7.3313	92.1835	78.3978	62.4753	49.3627	41.9034
8.5813	82.7010	72.8530	60.6537	49.7296	43.0022
9.2907	78.2468	70.0682	59.5752	49.7707	43.4857
10.000	74.4936	67.5969	58.4967	49.6903	43.8518
15.000	61.1661	57.7520	52.9484	47.8924	44.2469
20.000	53.6802	51.8261	49.1165	46.1260	43.8689
26.000	48.5556	47.5689	46.0899	44.4101	43.1080
32.000	45.3983	44.8540	44.0223	43.0618	42.3063
38.000	43.3293	43.0240	42.5484	41.9926	41.5517
44.000	41.8940	41.7228	41.4496	41.1267	40.8687
50.000	40.8495	40.7551	40.5987	40.4114	40.2606
56.000	40.0565	40.0061	39.9179	39.8100	39.7223
60.000	39.6111	39.5804	39.5230	39.4512	39.3923

Tablo 5.2. Ansys ile yapılan analiz sonucu SOLID90 element tipi için ark noktasına belirli uzaklıktaki sıcaklıkların zamanla değişimleri

***** ANSYS POST26 VARIABLE LISTING					
TIME	5mmUza	10mmUza	15mmUza	20mmUza	22.5mmUza
0.10000E-01	30.0000	30.0000	30.0000	30.0000	30.0000
0.29333E-01	30.2676	30.0000	30.0000	30.0000	30.0000
0.48667E-01	31.6948	30.0002	30.0000	30.0000	30.0000
0.66667E-01	34.4758	30.0010	30.0000	30.0000	30.0000
0.84667E-01	38.9183	30.0030	30.0000	30.0000	30.0000
0.10267	45.0995	30.0076	30.0000	30.0000	30.0000
0.12235	53.7281	30.0183	30.0000	30.0000	30.0000
0.14435	65.4476	30.0426	30.0000	30.0000	30.0000
0.16635	79.1402	30.0856	30.0001	30.0000	30.0000
0.18835	94.8351	30.1545	30.0002	30.0000	30.0000
0.21035	112.125	30.2575	30.0004	30.0000	30.0000
0.23235	130.583	30.4030	30.0008	30.0000	30.0000
0.25435	150.131	30.5992	30.0015	30.0000	30.0000
0.27635	170.686	30.8541	30.0027	30.0000	30.0000
0.28817	182.017	31.0094	30.0034	30.0000	30.0000
0.30000	193.588	31.1839	30.0044	30.0000	30.0000
1.2700	247.399	58.7648	35.2485	31.0841	30.4742
2.0700	178.342	68.7192	40.2075	32.6600	31.2781
2.8700	128.757	69.8657	43.9820	34.4876	32.3653
3.6700	101.245	67.5466	46.2595	36.1906	33.5375
4.4700	85.4780	64.3568	47.3486	37.5781	34.6374
5.2700	75.5559	61.2197	47.6451	38.6068	35.5792
6.3597	67.0550	57.5430	47.2806	39.4473	36.5251
7.5597	60.7806	54.2278	46.4722	39.8937	37.2132
8.7597	56.2822	51.5266	45.5265	40.0302	37.6318
9.3799	54.3195	50.2779	45.0257	40.0378	37.7879
10.000	52.6341	49.1569	44.5283	39.9987	37.8946
15.000	45.8206	44.0987	41.6637	39.0851	37.7402
20.000	42.0184	41.0821	39.7116	38.1961	37.3146
26.000	39.4202	38.9234	38.1787	37.3332	36.7694
32.000	37.8226	37.5501	37.1339	36.6536	36.2765
38.000	36.7762	36.6246	36.3885	36.1129	35.8492
44.000	36.0518	35.9676	35.8331	35.6743	35.4821
50.000	35.5250	35.4791	35.4029	35.3116	35.1658
56.000	35.1250	35.1009	35.0584	35.0064	34.8919
60.000	34.9002	34.8858	34.8585	34.8242	34.7259



Şekil 5.7. Analiz yapılacak olan malzeme için ağ yapısının gösterimi

5.1.5. Uygulanacak Sınır Şartları ve Yüklerin Belirlenmesi

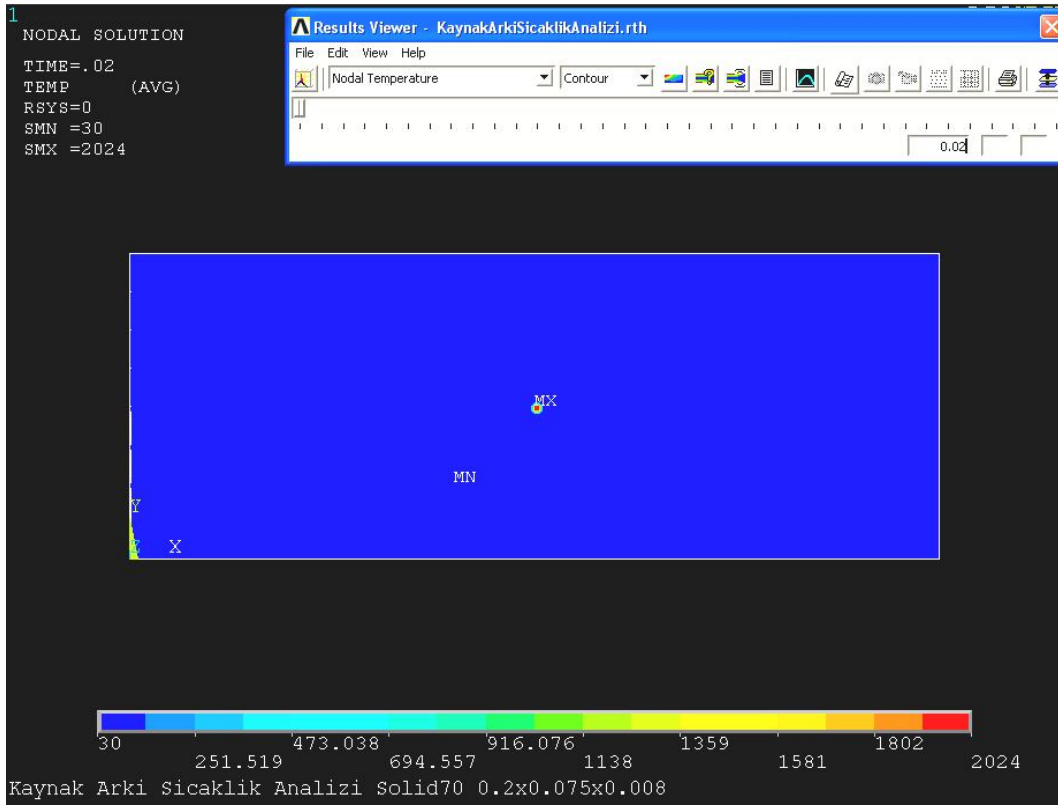
Deneyssel olarak yapılan analiz sonrası 0.3 sn içinde toplam 5 mm çapında dairesel bir ark numune yüzeyinde oluşmuştur. Kaynak makinesi bu işlem için ortalama 3800 W ısı enerjisi vermiştir. Ark noktasına uygulanan ısı enerjisi için ısı akısı şeklinde ANSYS de Heat Flux komutu kullanılmıştır. Model üzerinde ağ yapısı oluşturulurken SOLID70 tipi element için bir yüzeyinden ısı akısı olarak bu ısı enerjisi 0.3 sn verilmiştir. Uygulanacak olan ısı akısı toplam 1 adet elementin bir yüzeyine verilecektir. Kare şeklinde verilecek olan ısı akısı toplam 1 mm x 1 mm yüzey alanına sahip olacaktır. Kaynak torcunda bulunan telin kalınlığı 0.8 mm olduğu için bu şekilde bir tek bir element üzerine verilen ısı ele alınmıştır.

Deneyde ortam ve malzeme sıcaklığı başlangıç şartı olarak uniform 30°C derece alınmıştır. Yüzeylerde taşınım ihmal edilmiştir. Sistemde doğal taşınım olması

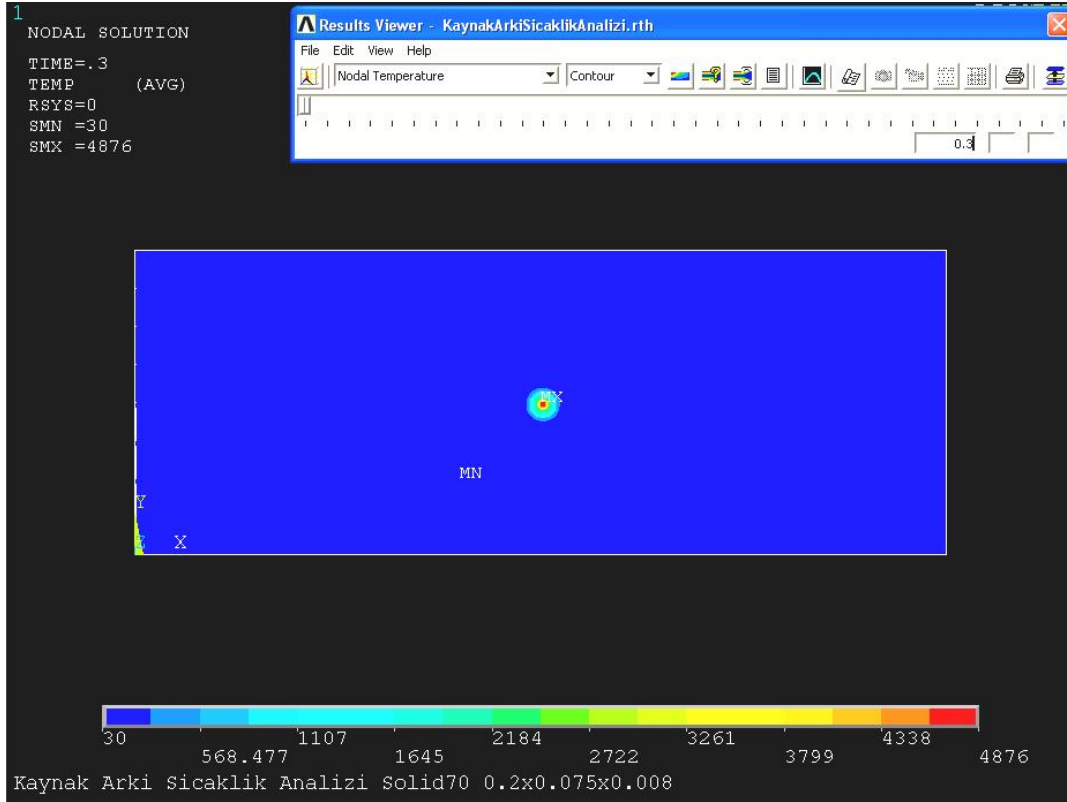
ve sıcaklığa etkisinin az olması sebebiyle taşınım ve ışıınım ihmal edilmiştir. 3. Bölümde anlatılan taşınımsal hesaplamalar doğrultusunda çıkan en yüksek taşınım katsayısı malzemenin üst yatay yüzeyinden $39 \text{ W / m}^2\text{K}$ dir.

5.1.6. Çözümlemenin Yapılması

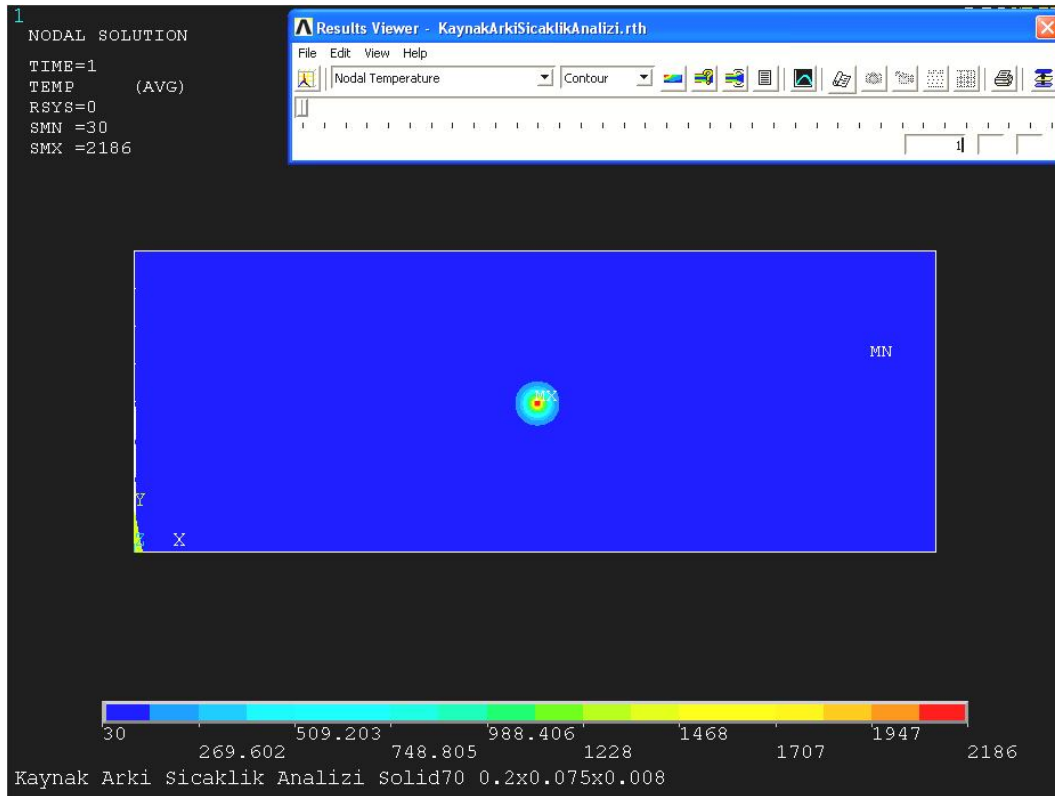
Çözümleme işleminde girilen kuvvetler doğrultusunda 0.3 sn ısı akısı verilecek şekilde bir başlangıç yük adımı işlemi gerçekleştirilip daha sonra ise soğuma işlemi için 59.7 sn boyunca iki farklı yük adımı işlemi daha yapılmıştır. Isı akısının verilmesi sırasındaki değerlerin hassas olması amacıyla 0.02 sn aralıklar ile ilk yük adımı iterasyonlanmıştır. Daha sonra soğuma işleminde ise yük adımları ilk iterasyon değeri için süre aralığı 1 sn olarak 10 sn boyunca ikinci iterasyon değeri için süre aralığı 5 sn olarak 50 sn boyunca girilmiştir. (Şekil 5.8.) (Şekil 5.9.) (Şekil 5.10.)



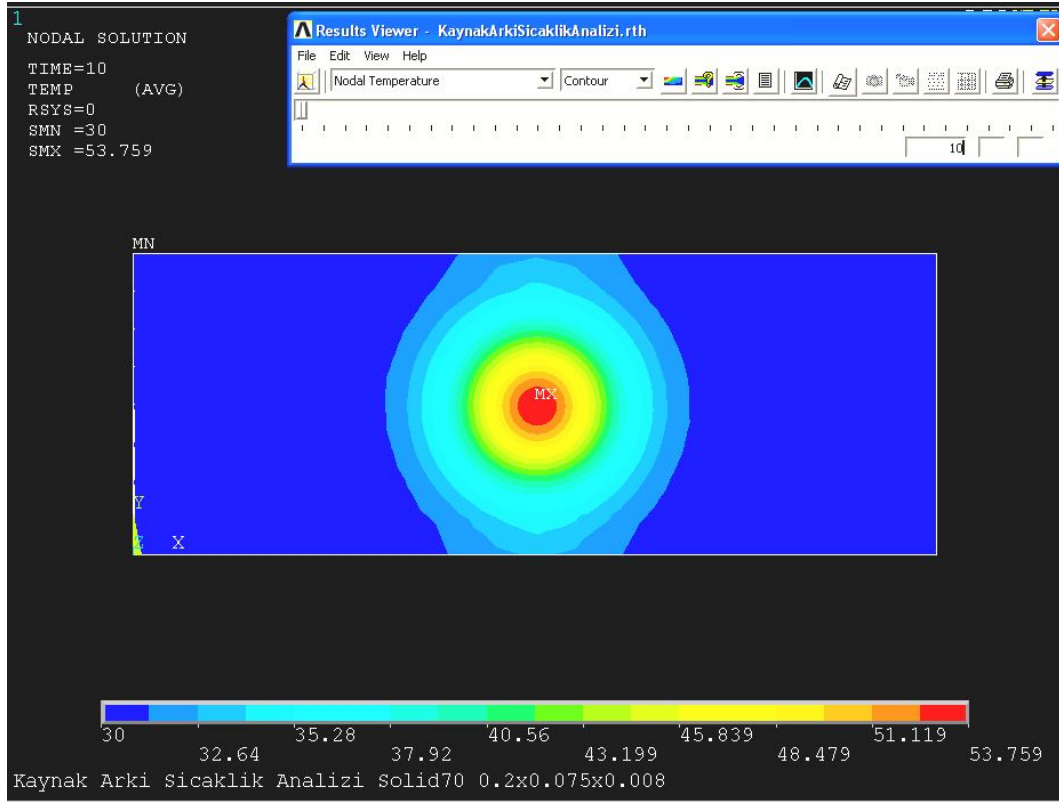
Şekil 5.8. 0.02 sn sonraki sıcaklık dağılımının gösterilmesi



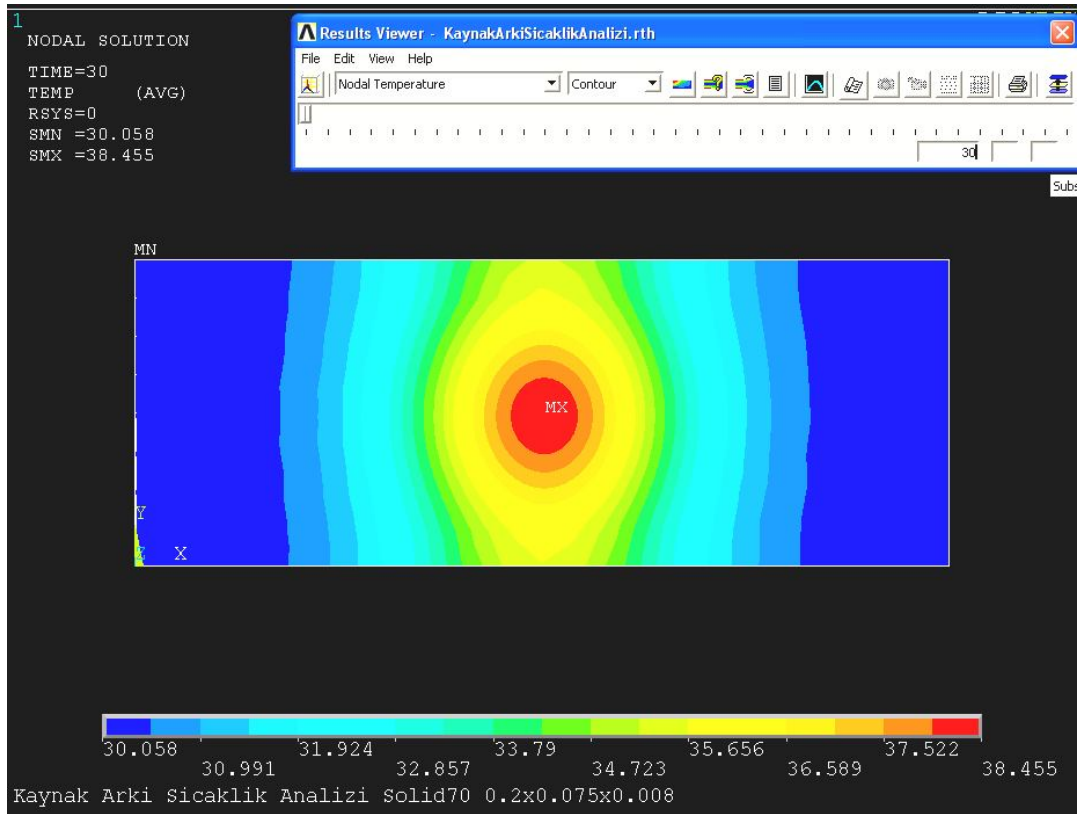
Şekil 5.9. 0.30 sn sonraki sıcaklık dağılımının gösterilmesi



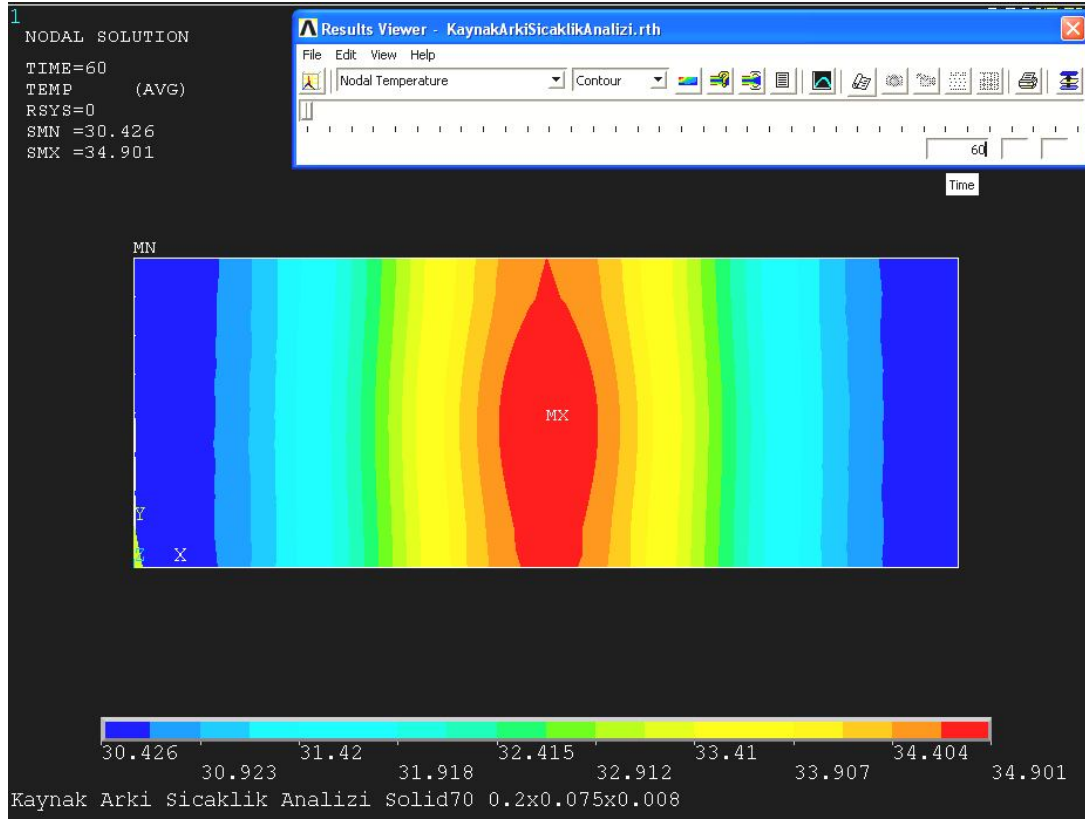
Şekil 5.10. 1 sn sonraki sıcaklık dağılımının gösterilmesi



Şekil 5.11. 10 sn sonraki sıcaklık dağılımının gösterilmesi



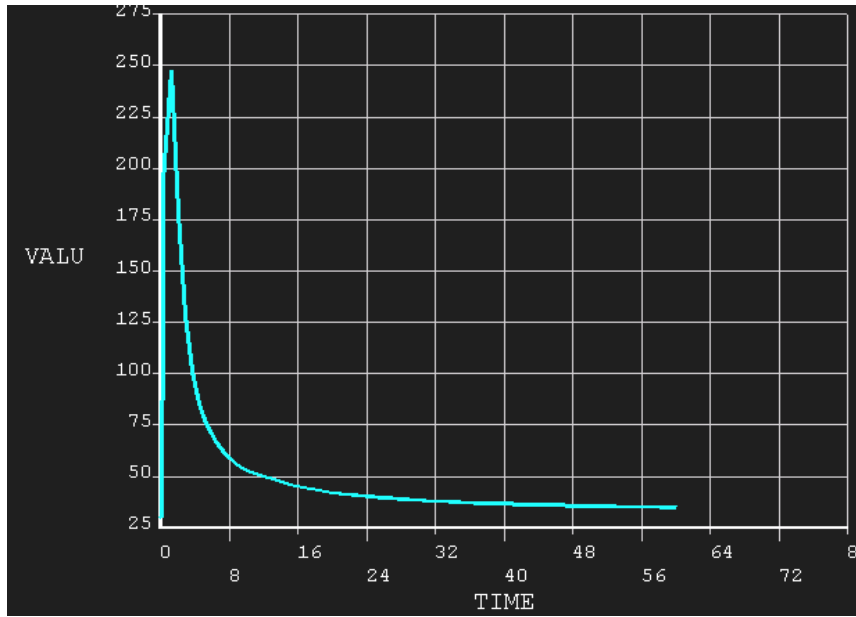
Şekil 5.12. 30 sn sonraki sıcaklık dağılımının gösterilmesi



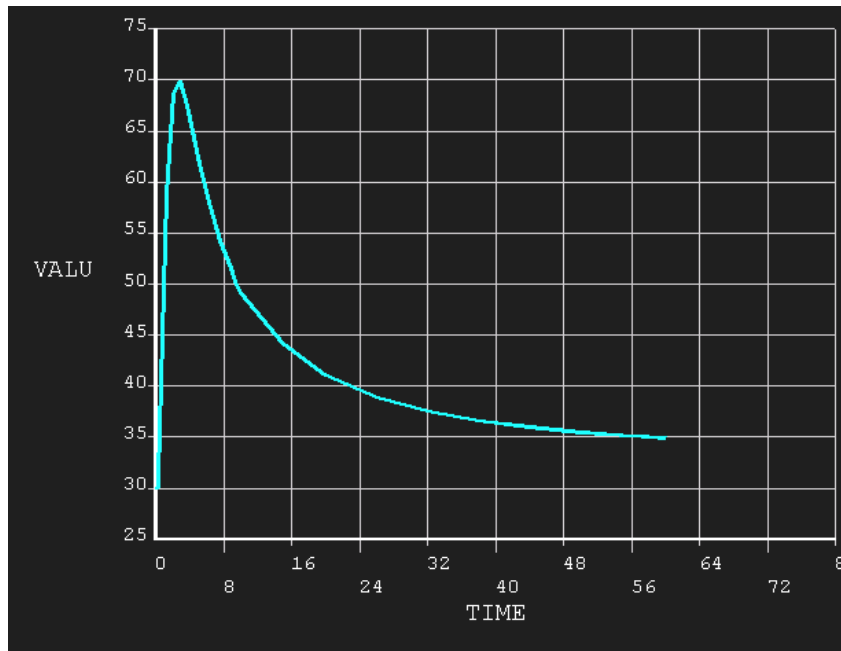
Şekil 5.13. 60 sn sonraki sıcaklık dağılımının gösterilmesi

5.1.7. Sonuçların Alınması

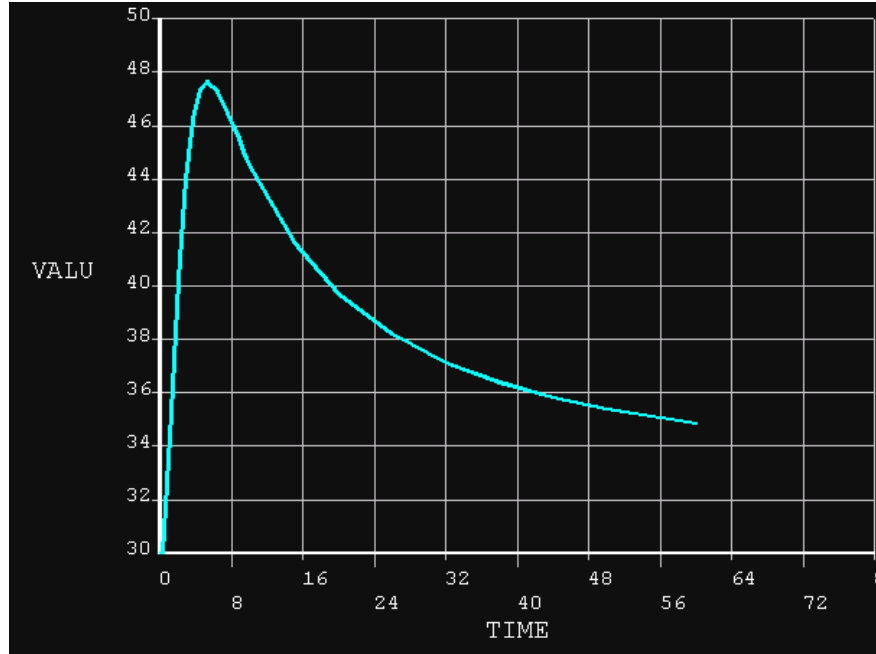
Yapılan analiz sonrası sıcaklık değerleri için istenilen noktaların zaman bağlı ısı dağılımları gözlemlenmiştir. Daha önceden yapılan deneysel analizde ölçüm noktası olarak belirlenen nokta için sıcaklık değişim değerleri alınmıştır. (Şekil 5.1.), (Şekil 5.13.) Bu alınan değerler grafiksel olarak çizilmiştir. Ark noktasından x eksenine göre 20 mm uzaklıktaki bu nokta için alınan sıcaklık değerleri ile x eksenine göre 15 mm ve 22,5 mm uzaklıktaki noktalar içinde sıcaklık değerleri alınarak grafikte maksimum ve minimum sıcaklık aralığı şeklinde olması gereken sıcaklık dağılım aralığı tespit edilmiştir.



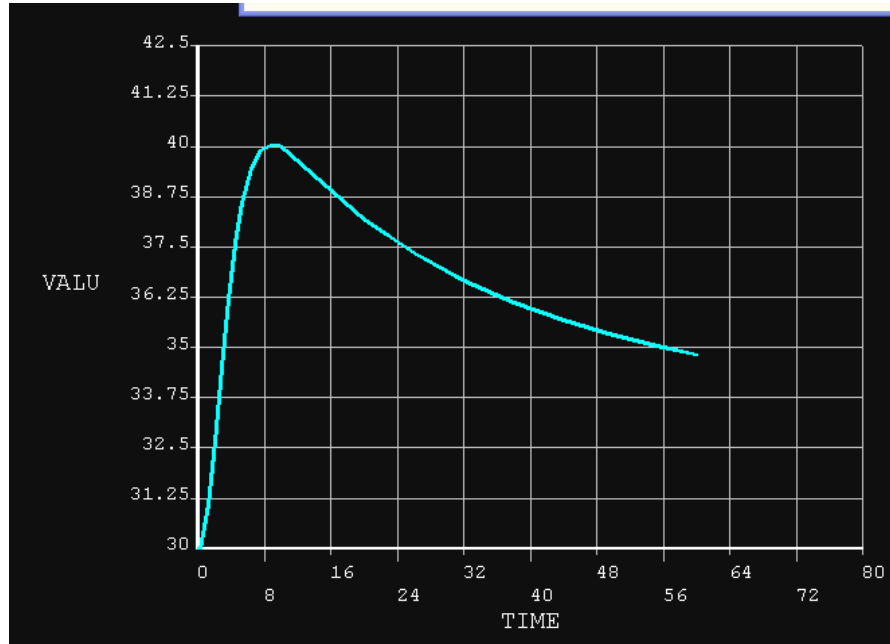
Şekil 5.14. Ark noktasından 5mm uzaklıktaki bir noktanın sıcaklığı zaman grafiği



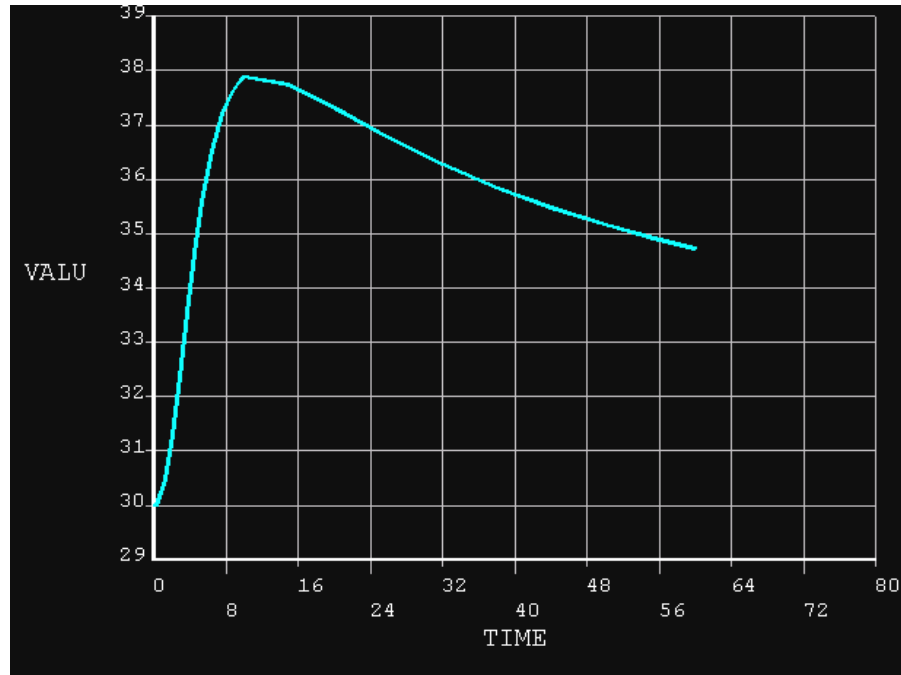
Şekil 5.15. Ark noktasından 10mm uzaklıktaki bir noktanın sıcaklığı zaman grafiği



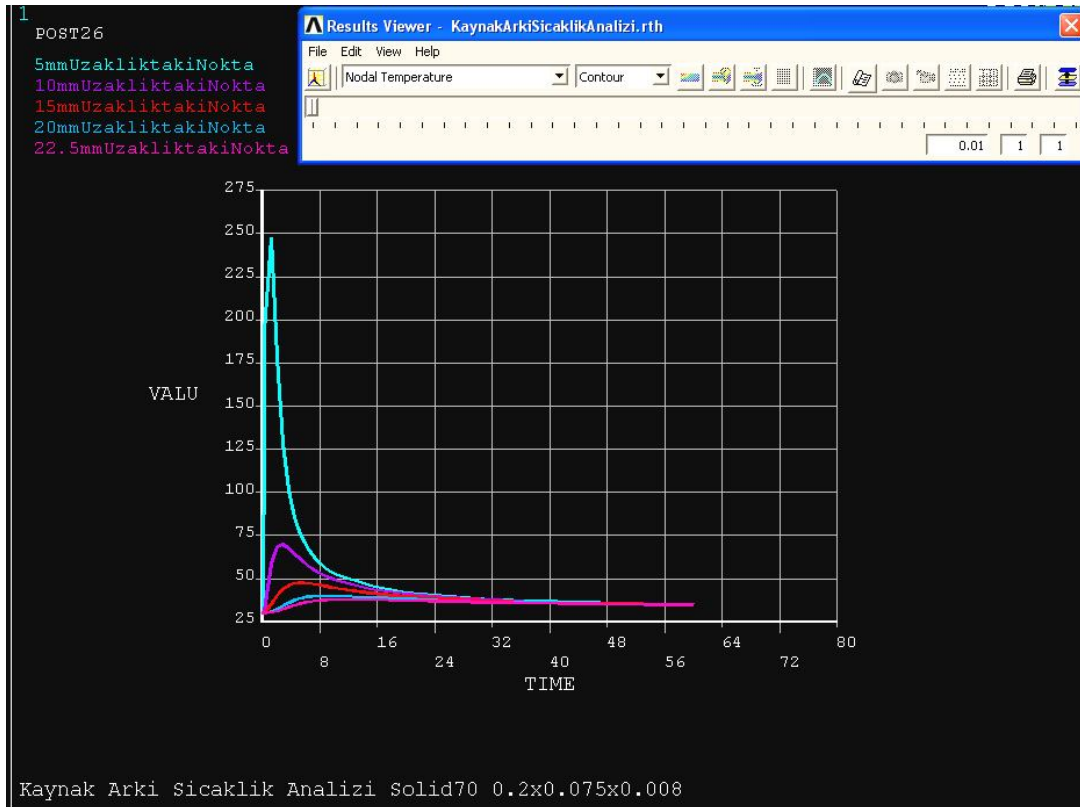
Şekil 5.16. Ark noktasından 15mm uzaklıktaki bir noktanın sıcaklığı zaman grafiği



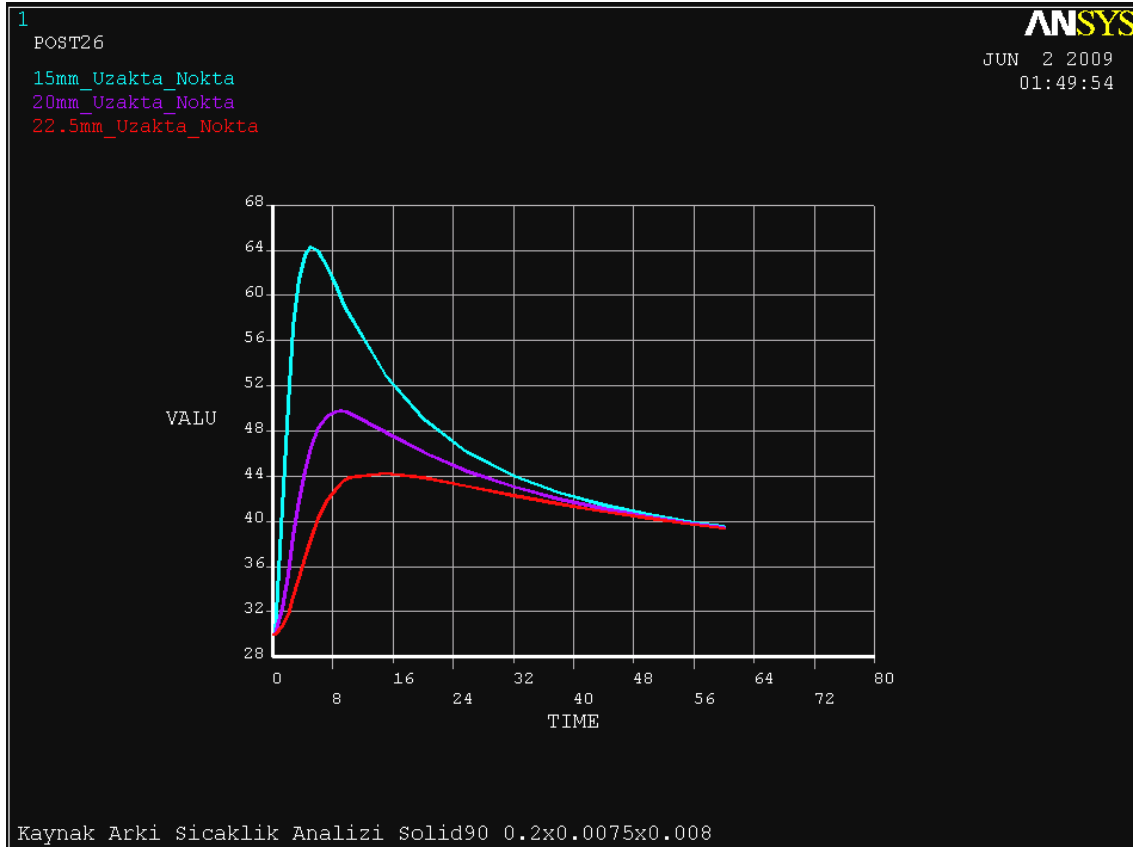
Şekil 5.17. Ark noktasından 20mm uzaklıktaki bir noktanın sıcaklığı zaman grafiği



Şekil 5.18. Ark noktasından 22,5mm uzaklıktaki bir noktanın sıcaklığı zaman grafiği



Şekil 5.19. Ark noktasına göre farklı uzaklıklardaki noktaların sıcaklık zaman grafiğinde ortak gösterimi



Şekil 5.20. Ark noktasına göre minimum ve maksimum sıcaklık değişim aralığı

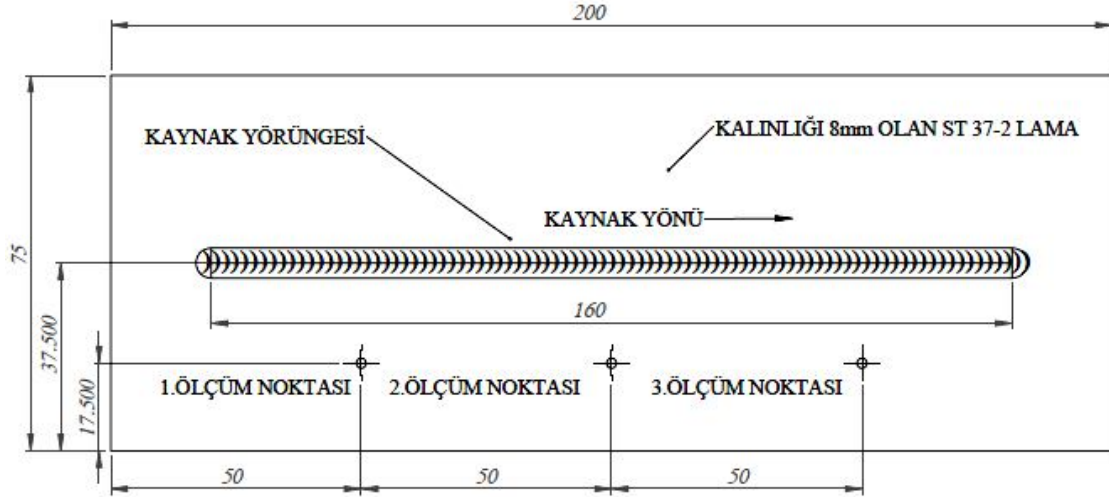
5.2. Hareketli Isı Kaynağı İçin Analiz İşlemi

5.2.1. Problemin Belirlenmesi

Hareketli ısı kaynağı analizi için 4. Bölümde yapılmış olan deneysel çalışmanın bir benzeri bilgisayar ortamında sonlu elemanlar analizi ile analiz edilmek istenmiştir. Deneysel çalışmada kullanılarak kaynak makinesinin ve kaynak robotunun parametreleri sonlu eleman analiz programı olan ANSYS girilerek analiz gerçekleştirilecektir.

Bu parametreler Şekil 5.21 de gösterildiği gibi öncelikle geometrik ölçüler olmaktadır. Daha sonra ise kaynak makinesinin torc ucundan verdiği Q ısıdır. Bu ısı akım ile gerilimi çarpımı sonucu belirlenir. Fakat kaynak torcu zamanın fonksiyonu şeklinde hareket etmesinden dolayı verilen akım ile gerilimde zamanın fonksiyonu

şeklinde değişkenlik gösterecektir. Bu değerler Tablo 5.4. de zaman aralıkları 1 sn olacak şekilde çizelge ile gösterilmiştir. Bu değerler kaynak makinesi deneysel olarak kaynak yaparken kaynak makinesinin göstergesinden video ile alınmıştır.



Şekil 5.21. St37 malzemesi üzerine uygulanan kaynak dikişinin gösterilmesi

Tablo 5.4. Kaynak makinesi ile verilen ısı değerleri ile akım ve gerilim değerlerinin gösterimi

Zaman (sn)	Akım (A)	Gerilim (V)	Kaynak Makinesi Verimi	Verilen Isı (w)
0,01	166	22,2	0,88	3242,976
1	154	16,7	0,88	2263,184
2	149	23	0,88	3015,76
3	148	22,9	0,88	2982,496
4	149	23	0,88	3015,76
5	146	22,8	0,88	2929,344
6	147	22,7	0,88	2936,472
7	146	22,9	0,88	2942,192
8	144	22,8	0,88	2889,216
9	147	22,9	0,88	2962,344
10	147	22,8	0,88	2949,408
11	149	22,8	0,88	2989,536
12	147	22,8	0,88	2949,408
13	147	22,8	0,88	2949,408
14	147	22,8	0,88	2949,408
15	148	22,8	0,88	2969,472
16	148	22,8	0,88	2969,472
Ortalama	148,7647	22,44117647	0,88	2935,639

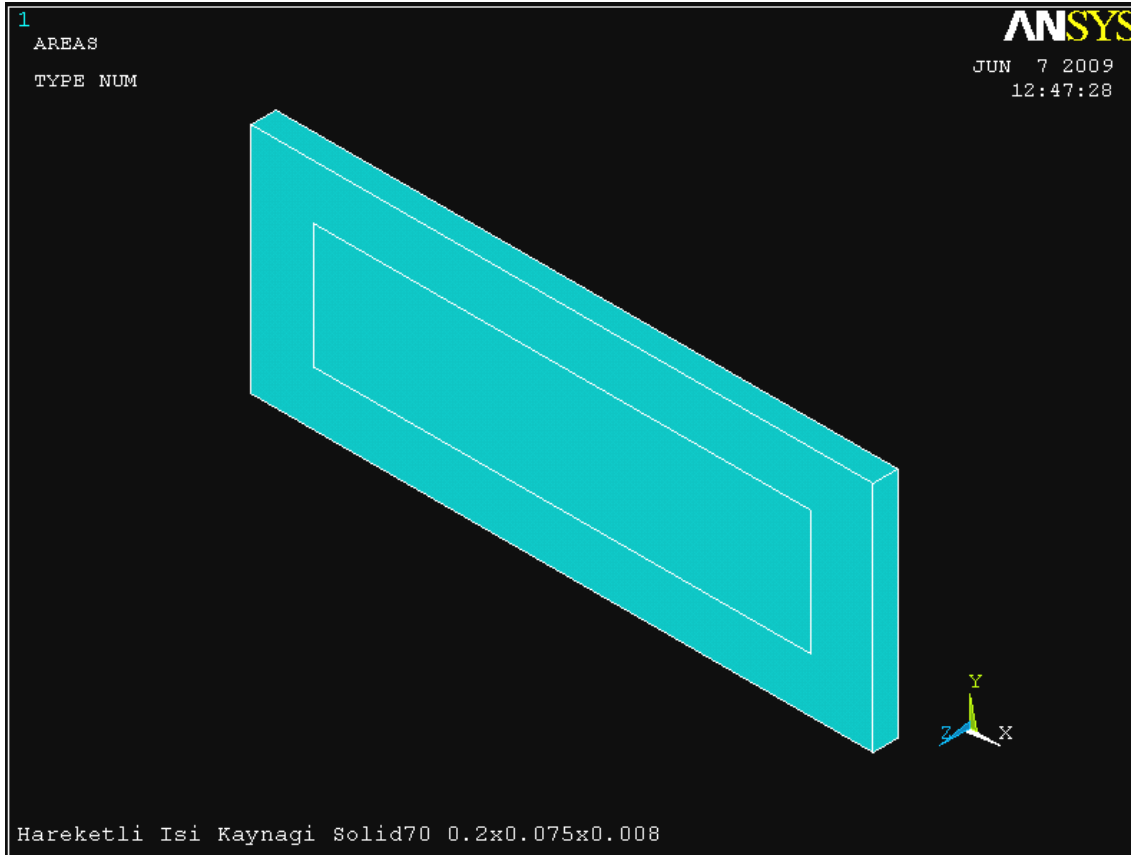
Şekil 5.21’ de gösterilen resim için 3 adet noktadan deneysel uygulamada ölçüm alınmıştır. Bu noktalar için ANSYS ile yapılan analizde de sıcaklık değerleri hesaplanacaktır.

Kaynak dikişinin bu noktalar uzaklığı x ekseninde 20 mm olup y ekseninde ise sol referans köşeden sırasıyla 50, 100, ve 150 mm dir. Kaynak yapılan kaynak dikişinin uzunluğu ise 160 mm dir. Bu kaynak dikişi yapılması sırasında kaynak robotu 16 sn süre ile torcun hareketine izin vermektedir. Bu izin verilen süre içerisinde devamlı olarak kaynak malzemesinin üzerine bir ısı verilmektedir. Daha sonraki süreçte ise verilen bu ısı kesilip malzemenin soğuma periyodu incelenmektedir. Bu periyot deneysel olarak kayıt edilen zaman dilimi 600 sn ile aynı olacak şekilde ANSYS’de analiz edilir.

5.2.2. Geometrik Modelin Oluşturulması

ANSYS de analiz gerçekleştirilirken katı modelin oluşturulması gerekmektedir. Bunun için noktasal ark sıcaklığı analizde kullanılan numune malzemesinin ölçüleri bu analiz içinde aynı şekilde geçerlidir. (Şekil 5.21)

Ark nokta sıcaklığı analizinde torcun bir noktaya teması sonucu sıcaklık analizi yapılmak istenmişti. Bunun sonucu da ağ yapısı hassasiyeti için bu noktanın temas ettiği bölgeye ikinci bir dikdörtgen prizma çizilmişti. Hareketli ısı kaynağı sıcaklık analizde ise torcun belirli bir mesafe hareket etmesinden dolayı ağ yapısının hassaslaştırılması torcun hareket ettiği mesafeye uygun olarak yapılması gerekmektedir. Bu nedenle farklı bir dikdörtgen prizma çizilmiştir. İkinci çizilmiş olan içteki dikdörtgen prizma ölçüleri ise 160x40x8 dir. (Şekil 5.22)



Şekil 5.22. Dikdörtgen prizma modelinin geometrik gösterimi

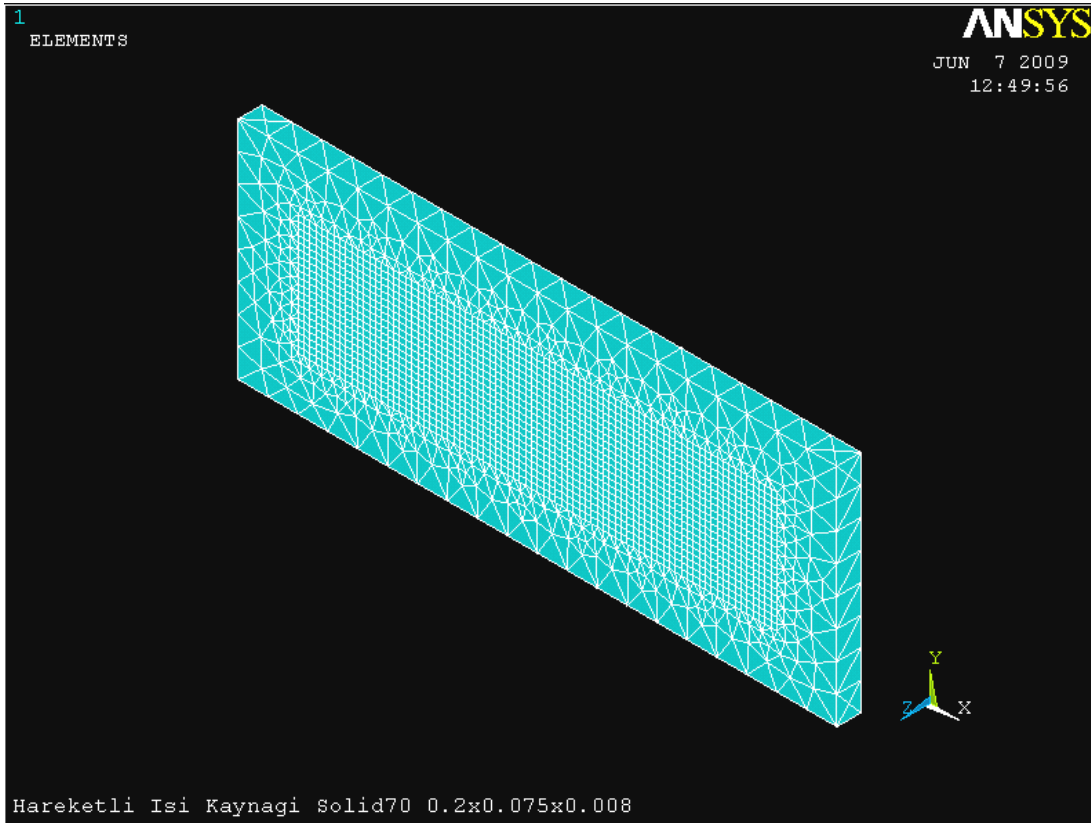
5.2.3. Malzeme Özelliklerinin Girilmesi

Analizde kullanılan malzemenin termal özelliği deneyde kullanılan numune malzemenin ki ile aynıdır. Ark nokta sıcaklığı analizi için kullanılan termal özellikler ile aynı değerler seçilmiştir. Zuheir Barsoum'un doktora tezinde kullanılmış olan St37 malzemesi için sıcaklığa bağlı olarak ısı iletim katsayısı ve özgül ısı için tablo listesi yapılmıştır. (Tablo 5.1.) (Şekil 5.4.) Sıcaklığa bağlı olarak termal özelliklerin girilmesinin sebebi ise sıcaklık sonucu ısı yayılım katsayısının değişkenlik göstermesidir. Bunun için farklı sıcaklıklardaki malzemenin termal özelliklerinin girilmesi gerekmektedir. Malzeme yoğunluk değeri ise sıcaklığa bağlı olarak girilmeyip standart oda sıcaklığına göre olan değer girilmiştir.

5.2.4. Ağ Yapısının Oluşturulması

Ark nokta sıcaklığı analizde kullanılan SOLID70 ağ yapısı hareketli ısı kaynağı analizde de kullanılmıştır. Ark kaynağı nokta sıcaklık analizi yapılırken geçen süre hareketli ısı kaynağı analizi yapılırken geçen süreye göre daha kısadır. Bu sebeple kullanılan SOLID70 ağ yapısının hızlı analiz etme özelliği bu analizde çok kullanışlı bir sonuç vermiştir.

İçteki dikdörtgen prizma da kullanılan element boyutu 0.002 m dir. Dıştaki dikdörtgen prizmaya uygulanan element boyutu ise 0.01m dir. Bu şekilde kaynak torcunun hareket ettiği bölgenin ağ yapısı daha hassa olmaktadır. Böylece girilen ısı değerleri daha ayrıntılı hesaplanmıştır.(Şekil 5.23.)



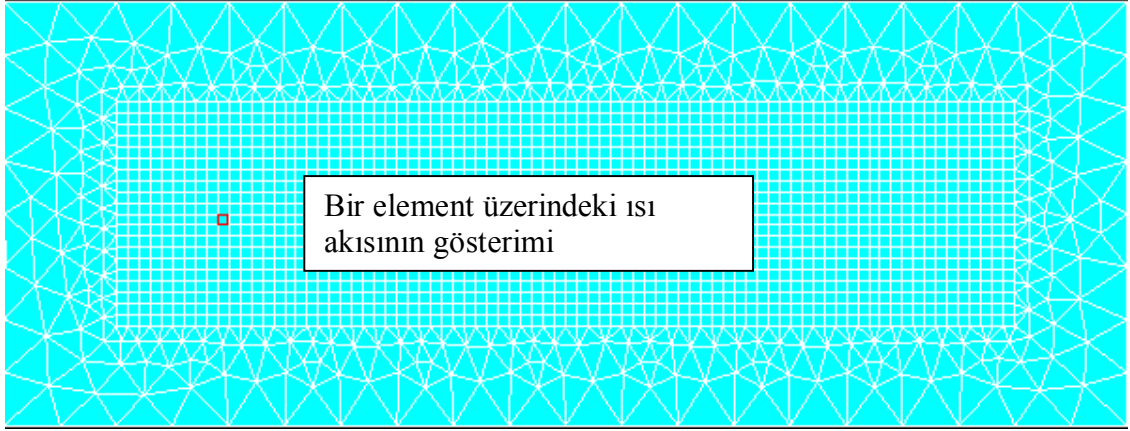
Şekil 5.23. Geometrik model üzerinde ağ yapısının gösterimi

5.2.5. Uygulanacak Sınır Şartları ve Yüklerin Belirlenmesi

Uygulanacak sınır şartları ve yüklerin belirlenmesinde deneysel olarak yapılan analiz baz alınmıştır. Deneysel analizde toplam ark dikiş boyu ve toplam girilen ısı ile kaynak süresi sonlu eleman analizi içinde aynı olarak düşünülmüştür.

Hareketli ısı kaynağının sıcaklık dağılımı analizi sonlu elemanlar yöntemi ile ANSYS de hesaplanması durumunda zamana bağlı olarak ısı kaynağının ve ısı akısının malzeme üzerindeki hareketi söz konusudur. Bu sebeple öncelikle hareketli ısı akısının belirlenmesi gerekmektedir. Deneysel uygulamada toplam kaynak dikiş boyu 160 mm'dir. Toplam kaynak süresi de 16 sn'dir. Buna göre her saniye aralığının da 10 mm kaynak hızı vardır. Bu durumda ise ısı kaynağının her saniye 10 mm hareket etmesi gerekmektedir. Isı kaynağının hareketi için ısı akısı olarak ısı kuvvetinin verilmesi gerekmektedir. Verilecek olan bu ısı akısı değeri her saniye aralığında kaynak makinesinin akım ve geriliminin değişmesine bağlı olarak değişme göstermektedir. Bunun için toplam kaynak süresine göre bir ortalama ısı akısı hesaplanmalıdır. (Tablo 5.4.) Hesaplanan ortalama saniyedeki ısı akısı için enerji değeri ise 2935 W dir. Bu değer kaynak torcunun saniyede yaptığı hareket ile verilen değerdir. ANSYS de bir saniye boyunca bu ısı akısı kaynak torcunun temas ettiği noktadaki bir element üzerine verilmektedir. Geometrik modele ait ağ yapısındaki en küçük element boyutunun 2 mm olması sebebiyle verilen ısı akısı değeri toplam 4 mm^2 alana sahip bir element üzerine verilmesi sonucu elementin alanına bölünmektedir. Element boyutu 2 mm olmasından dolayı torcun hareketi 0.2 sn de bir element kayması şeklinde gerçekleşmektedir. (Şekil 5.24.) Toplam 16 sn için 80 hareket yapacak olan torcun her hareketine bağlı olarak sıra ile ısı akısı verilmektedir.

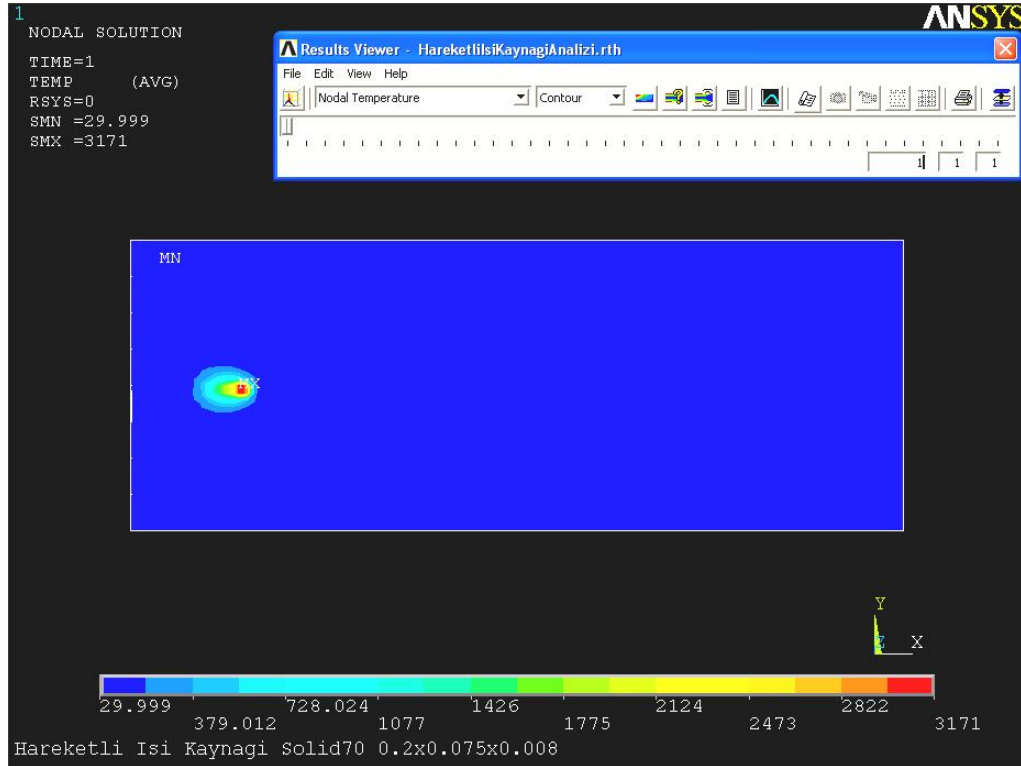
Başlangıç sınır şartları ve taşınımsal ile ışıınımsal sınır şartları noktasal ark sıcaklık analizindeki şartlar ile aynıdır. Ortam ve malzeme sıcaklığı $30 (^{\circ}\text{C})$ derecedir.



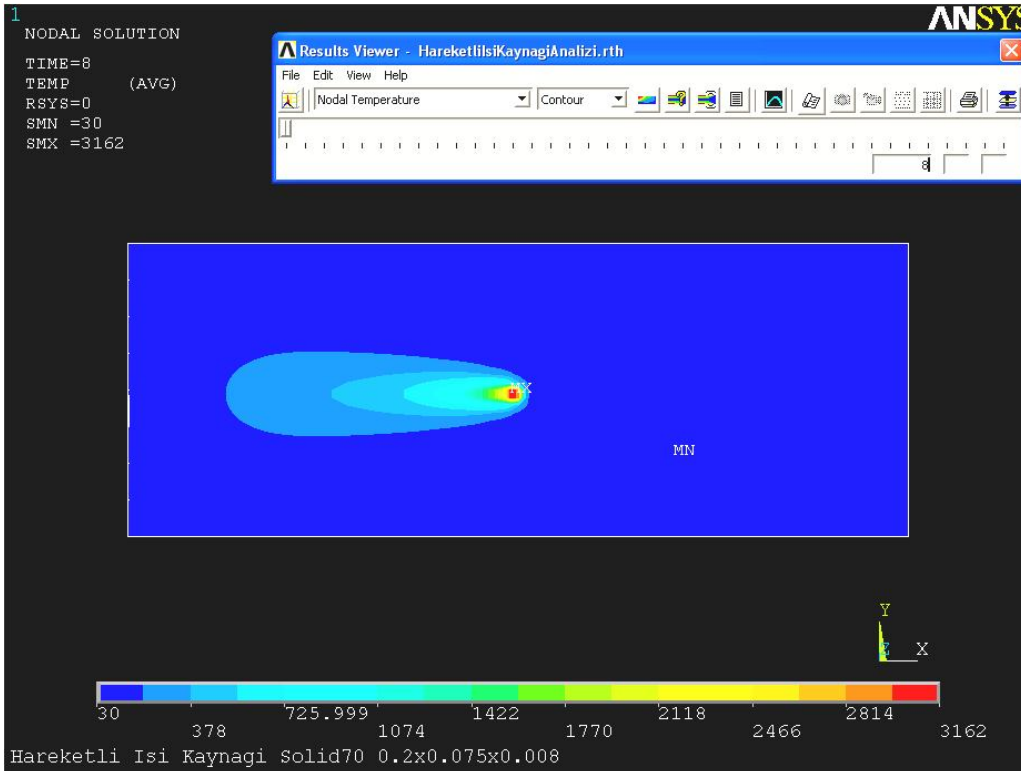
Şekil 5.24. 4 mm^2 olan ısı akısı alanı ve ısı akısının bir element üzerindeki gösterimi

5.1.6. Çözümlemenin Yapılması

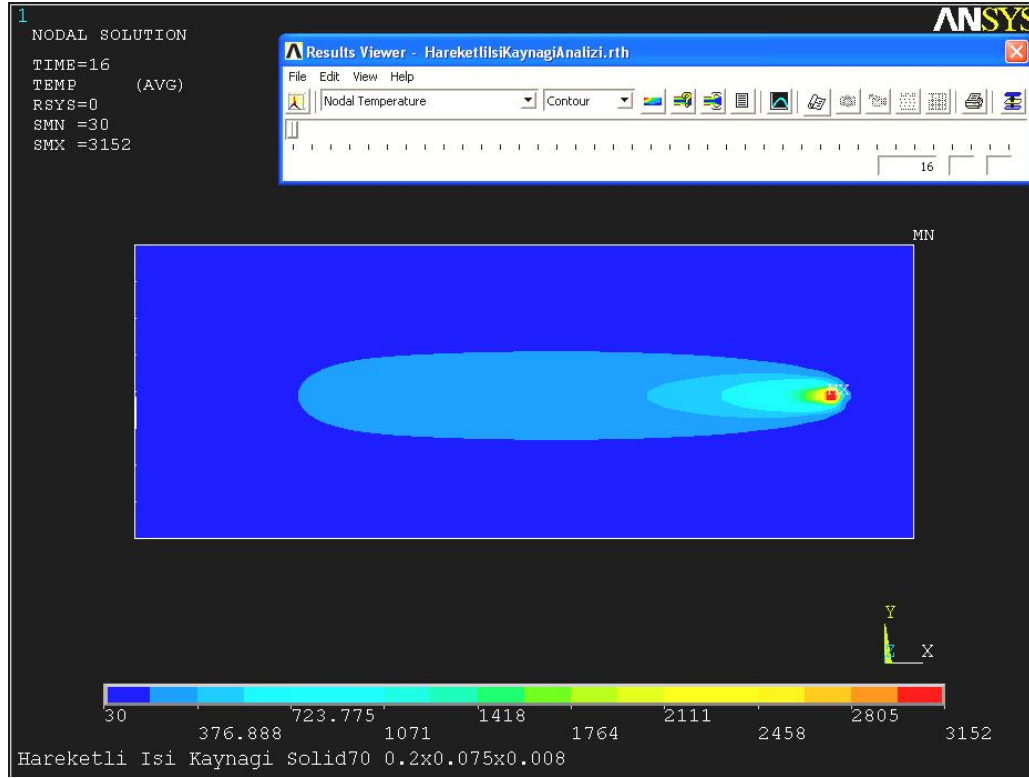
Hareketli ısı analizi için çözümleme işleminde girilen ısı kuvvetleri için öncelikle olarak 16 sn boyunca torcun hareketi ile kaynak yapılırken malzeme üzerine ısı akısı verilmektedir. Bu değer 0.2 sn aralıklar ile bir doğru şeklinde toplam 80 adet element üzerine verilmektedir. Bunun sonucu 80 adet yük adımı gerçekleşmektedir. Hesaplama iterasyonları buna göre yapılmaktadır. Daha sonra ise 600 sn boyunca gerçekleşecek olan soğuma periyodunda zaman dilimleri önce ilk 4 sn lik soğuma anında 1'er saniye aralıkla daha sonra ise 5'er, 10'ar, 20'şer ve 30'ar saniye aralıklar ile 600 sn lik toplam süre içerisinde 5 farklı tür yük adımı ile gerçekleşmektedir. (Şekil 5.25.), (Şekil 5.26.), (Şekil 5.27.), (Şekil 5.28.), (Şekil 5.29.), (Şekil 5.30.),



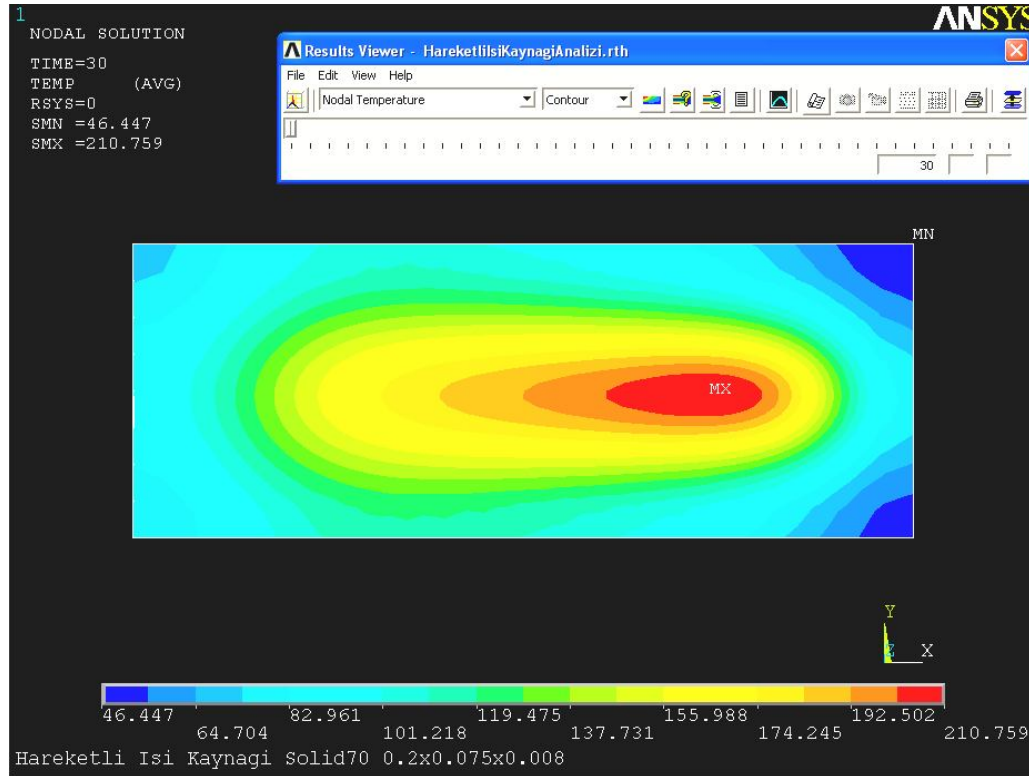
Şekil 5.25. 1 sn sonraki sıcaklık dağılımının gösterilmesi



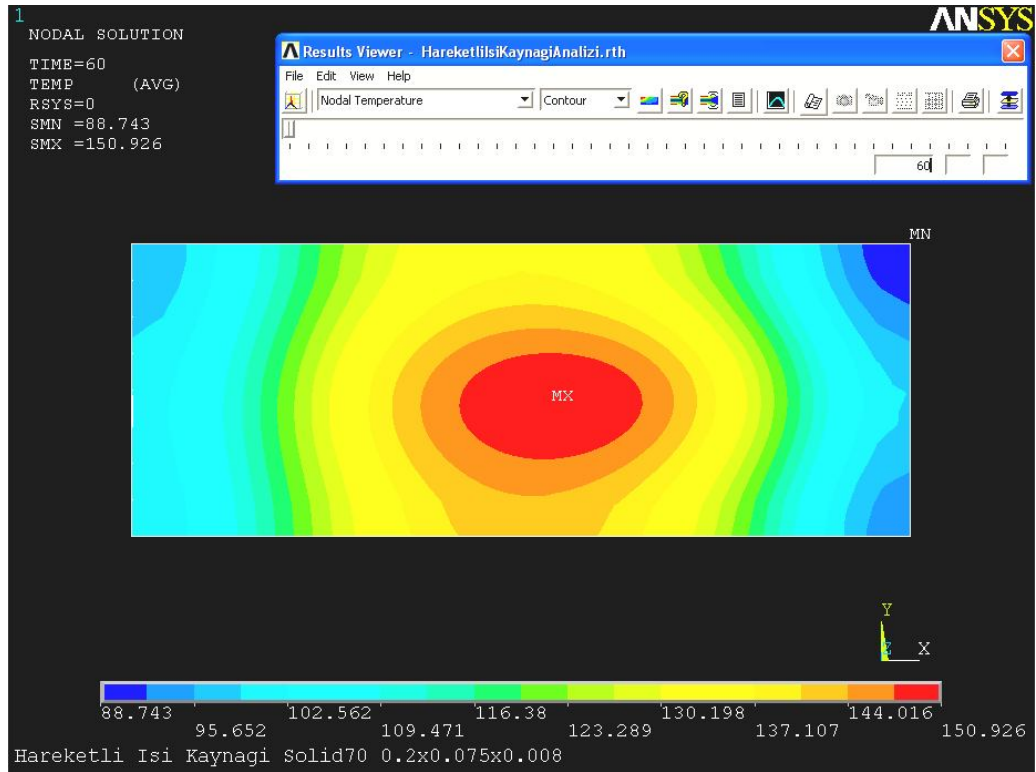
Şekil 5.26. 8 sn sonraki sıcaklık dağılımının gösterilmesi



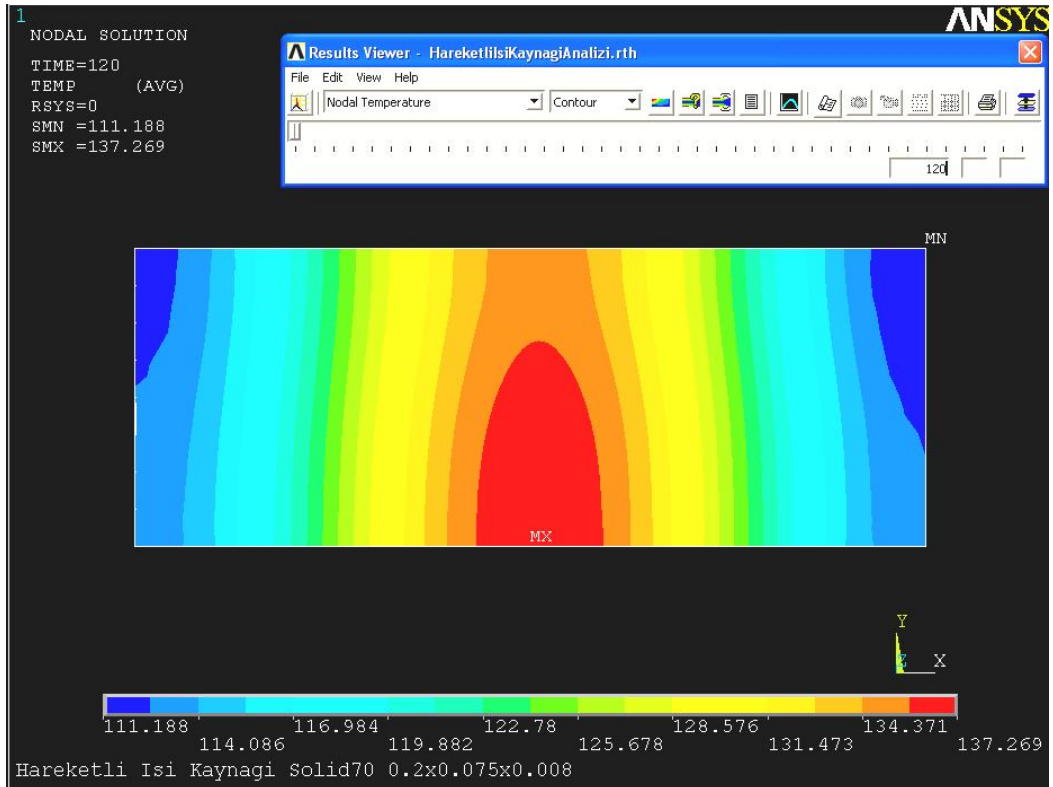
Şekil 5.27. 16 sn sonraki sıcaklık dağılımının gösterilmesi



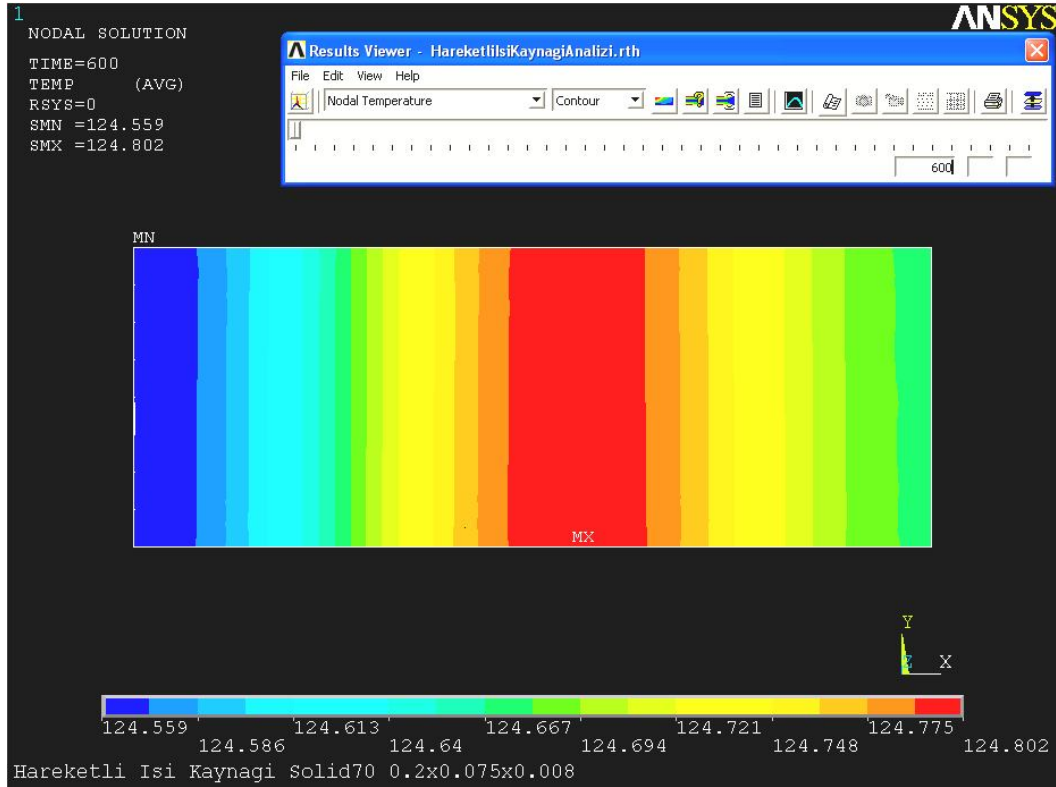
Şekil 5.28. 30 sn sonraki sıcaklık dağılımının gösterilmesi



Şekil 5.29. 60 sn sonraki sıcaklık dağılımının gösterilmesi



Şekil 5.30. 120 sn sonraki sıcaklık dağılımının gösterilmesi



Şekil 5.31. 600 sn sonraki sıcaklık dağılımının gösterilmesi

5.1.7. Sonuçların Alınması

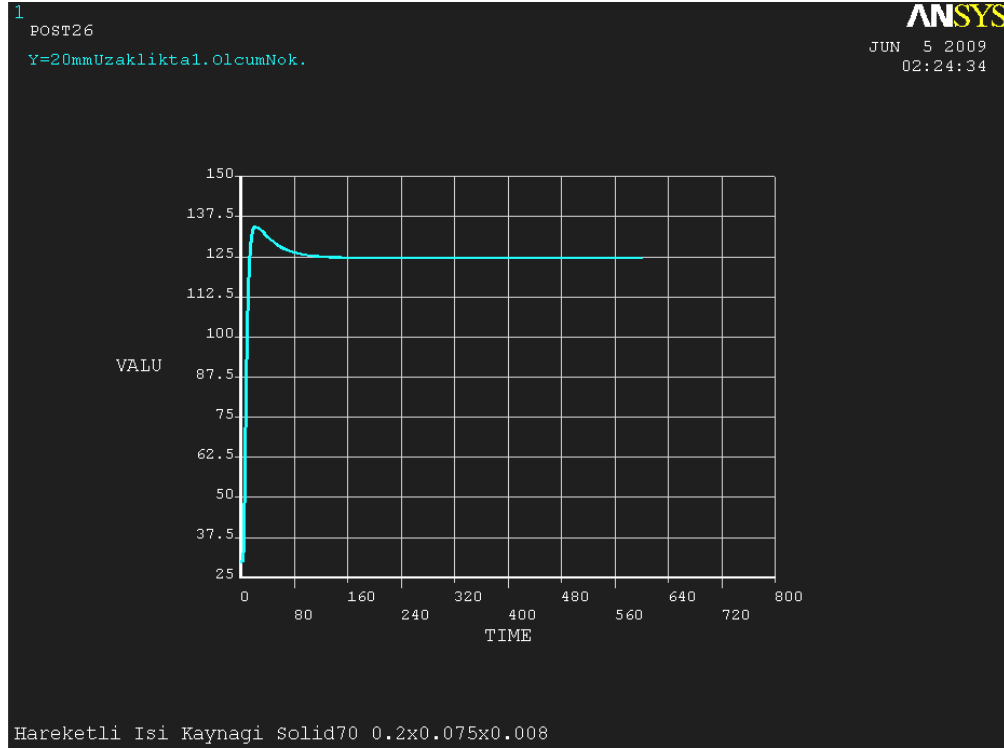
Sonlu eleman analizi sonrası hareketli ısı kaynağının analizi için yapılan hesaplamalara göre sıcaklık dağılımı sonuçları zamana bağlı olarak incelenmiştir. Deneysel olarak hareketli ısı kaynağı için sıcaklık değişimlerinin ölçüldüğü noktalar olan 3 adet ölçüm noktası için tablo oluşturulmuştur. Daha sonra kaynak dikişinden y eksenini boyunca 10 mm uzaklıktaki noktaların sıcaklıkları da tabloda gösterilmiştir.(Tablo 5.5.)

Tablo 5.5. Hareketli ısı kaynağı analizi için ölçülen noktaların çizelge halinde gösterimi

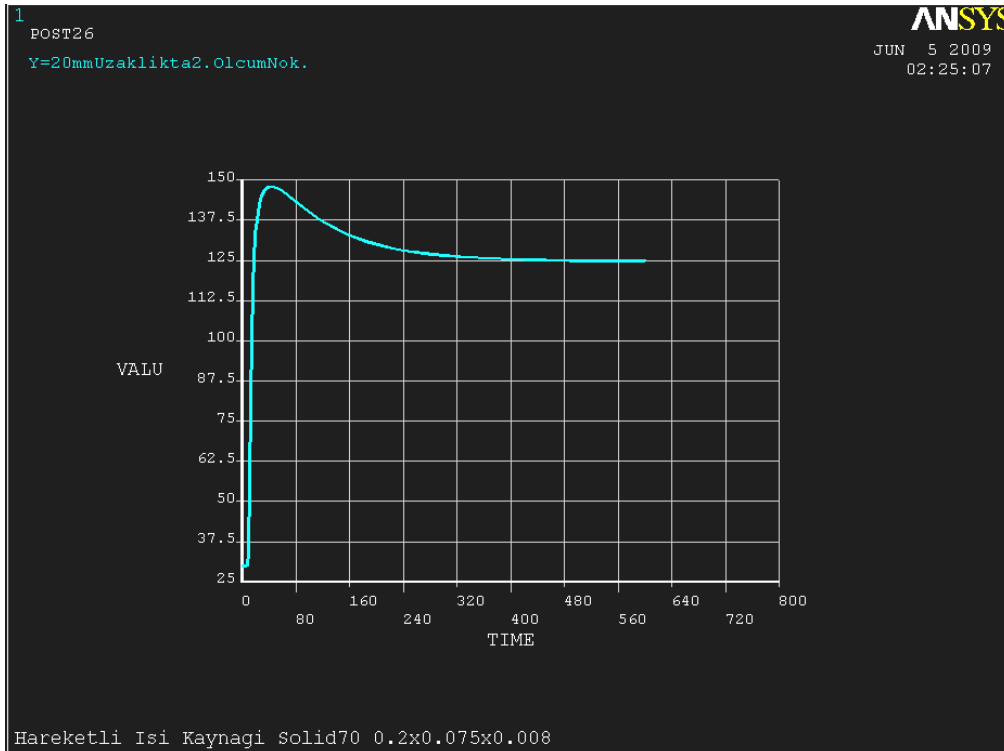
TIME	Y,20mm	Y=20mm	Y=20mm	Y=10mm	Y=10mm	Y=10mm
0.01000	30.0000	30.0000	30.0000	30.0000	30.0000	30.0000
0.20000	30.0000	30.0000	30.0000	30.0000	30.0000	30.0000
0.40000	30.0000	30.0000	30.0000	30.0001	30.0000	30.0000
0.60000	30.0000	30.0000	30.0000	30.0003	30.0000	30.0000
0.80000	30.0002	30.0000	30.0000	30.0015	30.0000	30.0000
1.0000	30.0007	30.0000	30.0000	30.0053	30.0000	30.0000
1.2000	30.0021	30.0000	30.0000	30.0167	30.0000	30.0000
1.4000	30.0055	30.0000	30.0000	30.0481	30.0000	30.0000
1.6000	30.0133	30.0000	30.0000	30.1296	30.0000	30.0000
1.8000	30.0296	30.0000	30.0000	30.3325	30.0000	30.0000
2.0000	30.0618	30.0000	30.0000	30.8192	30.0000	30.0000
2.2000	30.1214	30.0000	30.0000	31.9361	30.0000	30.0000
2.4000	30.2251	30.0000	30.0000	34.2946	30.0000	30.0000
2.6000	30.3959	30.0000	30.0000	38.7579	30.0000	30.0000
2.8000	30.6626	30.0000	30.0000	46.1720	30.0000	30.0000
3.0000	31.0580	30.0000	30.0000	57.0066	30.0000	30.0000
3.2000	31.6168	30.0000	30.0000	71.0219	30.0000	30.0000
3.4000	32.3717	30.0000	30.0000	87.3283	30.0000	30.0000
3.6000	33.3500	30.0000	30.0000	104.731	30.0000	30.0000
3.8000	34.5710	30.0000	30.0000	122.114	30.0000	30.0000
4.0000	36.0441	30.0000	30.0000	138.677	30.0000	30.0000
4.2000	37.7685	30.0000	30.0000	153.956	30.0000	30.0000
4.4000	39.7342	30.0000	30.0000	167.749	30.0000	30.0000
4.6000	41.9234	30.0000	30.0000	180.007	30.0000	30.0000
4.8000	44.3127	30.0000	30.0000	190.772	30.0000	30.0000
5.0000	46.8751	30.0000	30.0000	200.127	30.0001	30.0000
5.2000	49.5815	30.0001	30.0000	208.175	30.0003	30.0000
5.4000	52.4025	30.0002	30.0000	215.030	30.0007	30.0000
5.6000	55.3094	30.0004	30.0000	220.803	30.0017	30.0000
5.8000	58.2750	30.0009	30.0000	225.608	30.0041	30.0000
6.0000	61.2742	30.0020	30.0000	229.553	30.0101	30.0000
6.2000	64.2842	30.0042	30.0000	232.742	30.0249	30.0000
6.4000	67.2849	30.0088	30.0000	235.273	30.0611	30.0000
6.6000	70.2585	30.0181	30.0000	237.235	30.1490	30.0000
6.8000	73.1899	30.0360	30.0000	238.710	30.3600	30.0000
7.0000	76.0664	30.0693	30.0000	239.769	30.8565	30.0000
7.2000	78.8774	30.1286	30.0000	240.473	31.9845	30.0000
7.4000	81.6144	30.2298	30.0000	240.875	34.3551	30.0000
7.6000	84.2707	30.3943	30.0000	241.020	38.8313	30.0000

7.8000	86.8413	30.6492	30.0000	240.944	46.2590	30.0000
8.0000	89.3225	31.0263	30.0000	240.681	57.1081	30.0000
8.2000	91.7120	31.5593	30.0000	240.257	71.1389	30.0000
8.4000	94.0084	32.2806	30.0000	239.694	87.4623	30.0000
8.6000	96.2114	33.2184	30.0000	239.013	104.884	30.0000
8.8000	98.3213	34.3934	30.0000	238.229	122.289	30.0000
9.0000	100.339	35.8170	30.0000	237.357	138.877	30.0000
9.2000	102.266	37.4911	30.0000	236.410	154.185	30.0000
9.4000	104.104	39.4080	30.0000	235.398	168.011	30.0000
9.6000	105.856	41.5526	30.0000	234.331	180.308	30.0000
9.8000	107.524	43.9034	30.0000	233.217	191.117	30.0000
10.000	109.110	46.4351	30.0000	232.064	200.523	30.0001
10.200	110.617	49.1201	30.0001	230.878	208.629	30.0003
10.400	112.049	51.9299	30.0002	229.664	215.549	30.0007
10.600	113.407	54.8365	30.0004	228.429	221.395	30.0017
10.800	114.696	57.8131	30.0009	227.176	226.280	30.0041
11.000	115.917	60.8346	30.0020	225.910	230.313	30.0101
11.200	117.074	63.8784	30.0044	224.633	233.597	30.0249
11.400	118.170	66.9239	30.0092	223.350	236.230	30.0611
11.600	119.207	69.9532	30.0188	222.062	238.302	30.1490
11.800	120.188	72.9508	30.0374	220.773	239.894	30.3600
12.000	121.115	75.9033	30.0721	219.485	241.075	30.8565
12.200	121.992	78.7996	30.1337	218.200	241.909	31.9844
12.400	122.821	81.6307	30.2387	216.919	242.446	34.3549
12.600	123.603	84.3893	30.4093	215.643	242.733	38.8310
12.800	124.342	87.0696	30.6735	214.375	242.805	46.2586
13.000	125.039	89.6676	31.0639	213.115	242.694	57.1074
13.200	125.697	92.1802	31.6148	211.865	242.428	71.1379
13.400	126.317	94.6055	32.3597	210.625	242.028	87.4610
13.600	126.902	96.9426	33.3268	209.396	241.514	104.882
13.800	127.452	99.1913	34.5368	208.178	240.901	122.287
14.000	127.971	101.352	36.0008	206.973	240.205	138.874
14.200	128.460	103.426	37.7198	205.781	239.437	154.182
14.400	128.919	105.415	39.6852	204.601	238.607	168.007
14.600	129.351	107.320	41.8805	203.436	237.725	180.304
14.800	129.758	109.144	44.2831	202.284	236.799	191.112
15.000	130.139	110.888	46.8664	201.146	235.835	200.518
15.200	130.498	112.556	49.6016	200.022	234.841	208.624
15.400	130.834	114.150	52.4592	198.913	233.821	215.544
15.600	131.150	115.672	55.4102	197.818	232.780	221.390
15.800	131.446	117.126	58.4273	196.737	231.723	226.276
16.000	131.723	118.514	61.4849	195.672	230.653	230.309
17.000	132.741	124.106	75.9298	190.699	225.266	238.395

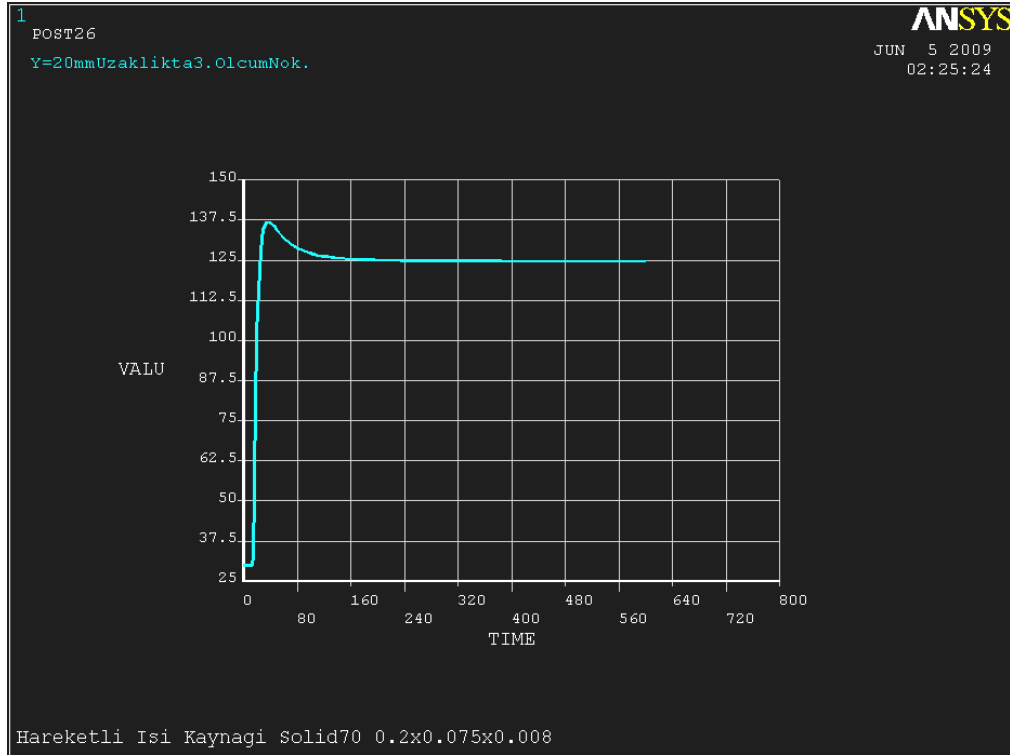
17.750	133.333	127.659	85.8628	187.165	221.280	240.270
18.500	133.784	130.673	94.7079	183.819	217.400	239.602
19.250	134.118	133.233	102.427	180.656	213.656	237.395
20.000	134.355	135.411	109.064	177.665	210.067	234.255
25.000	134.170	142.317	127.940	163.313	192.454	209.038
29.000	133.517	145.302	134.516	154.562	181.654	191.135
33.000	132.670	146.906	136.829	147.878	173.397	176.575
38.320	131.508	147.793	136.872	141.547	165.547	162.446
44.137	130.343	147.962	135.684	136.712	159.465	151.664
50.137	129.304	147.642	134.154	133.237	154.944	144.005
55.069	128.563	147.161	132.922	131.120	152.058	139.405
60.000	127.929	146.531	131.802	129.543	149.756	136.023
70.000	126.991	144.959	130.057	127.627	146.406	131.972
80.000	126.316	143.276	128.754	126.466	143.810	129.522
92.000	125.769	141.270	127.655	125.673	141.317	127.818
104.00	125.401	139.372	126.881	125.217	139.223	126.796
112.00	125.215	138.171	126.477	125.012	137.965	126.316
120.00	125.075	137.044	126.160	124.874	136.822	125.970
140.00	124.880	134.694	125.678	124.717	134.505	125.506
160.00	124.770	132.767	125.378	124.647	132.623	125.244
184.00	124.699	130.957	125.164	124.615	130.858	125.071
208.00	124.662	129.550	125.033	124.604	129.483	124.970
224.00	124.646	128.763	124.971	124.602	128.714	124.923
240.00	124.636	128.105	124.925	124.603	128.068	124.890
270.00	124.628	127.200	124.873	124.608	127.178	124.852
300.00	124.627	126.537	124.840	124.614	126.523	124.827
334.00	124.629	126.005	124.816	124.622	125.997	124.808
368.00	124.633	125.628	124.799	124.629	125.623	124.795
402.00	124.638	125.361	124.787	124.635	125.358	124.784
436.00	124.643	125.171	124.777	124.642	125.170	124.776
470.00	124.648	125.037	124.770	124.647	125.036	124.769
504.00	124.653	124.941	124.763	124.653	124.941	124.763
538.00	124.658	124.874	124.758	124.658	124.873	124.757
572.00	124.662	124.826	124.753	124.662	124.825	124.753
600.00	124.666	124.796	124.749	124.666	124.796	124.749



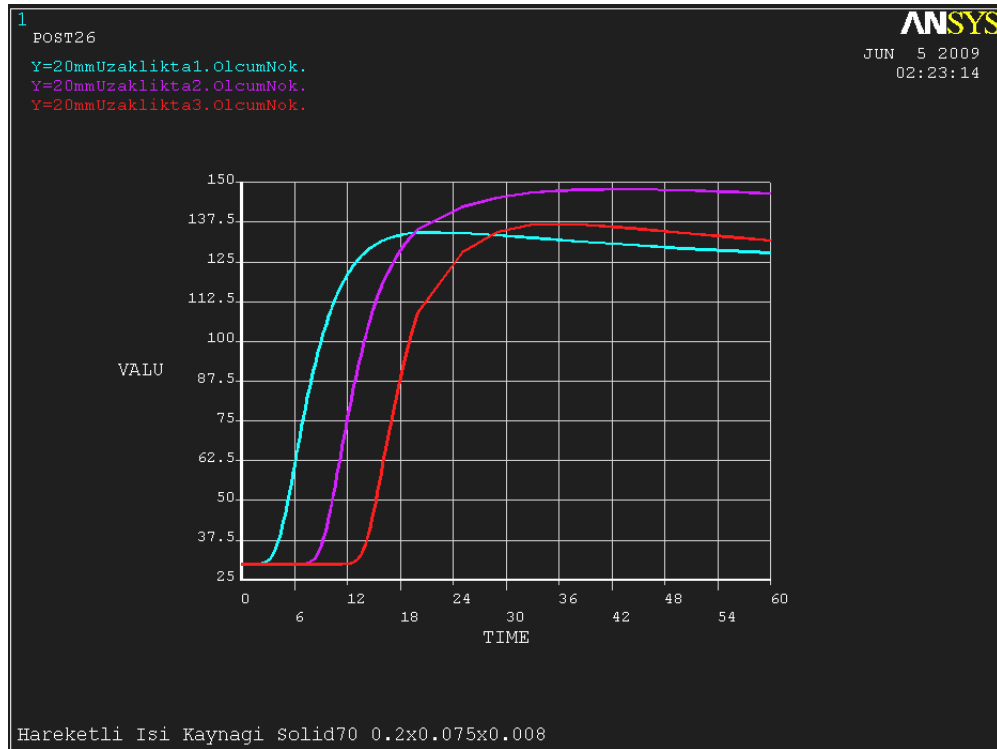
Şekil 5.32. Hareketli ısı kaynağından 20 mm uzaklıktaki 1. ölçüm noktası sıcaklık grafiği



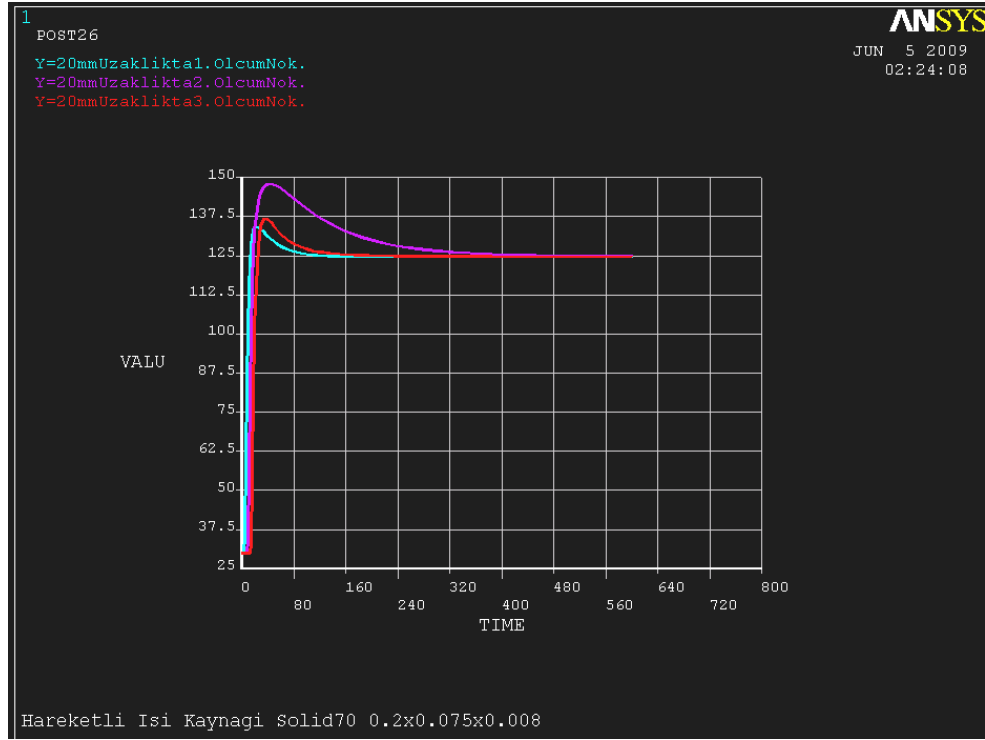
Şekil 5.33. Hareketli ısı kaynağından 20 mm uzaklıktaki 2. ölçüm noktası sıcaklık grafiği



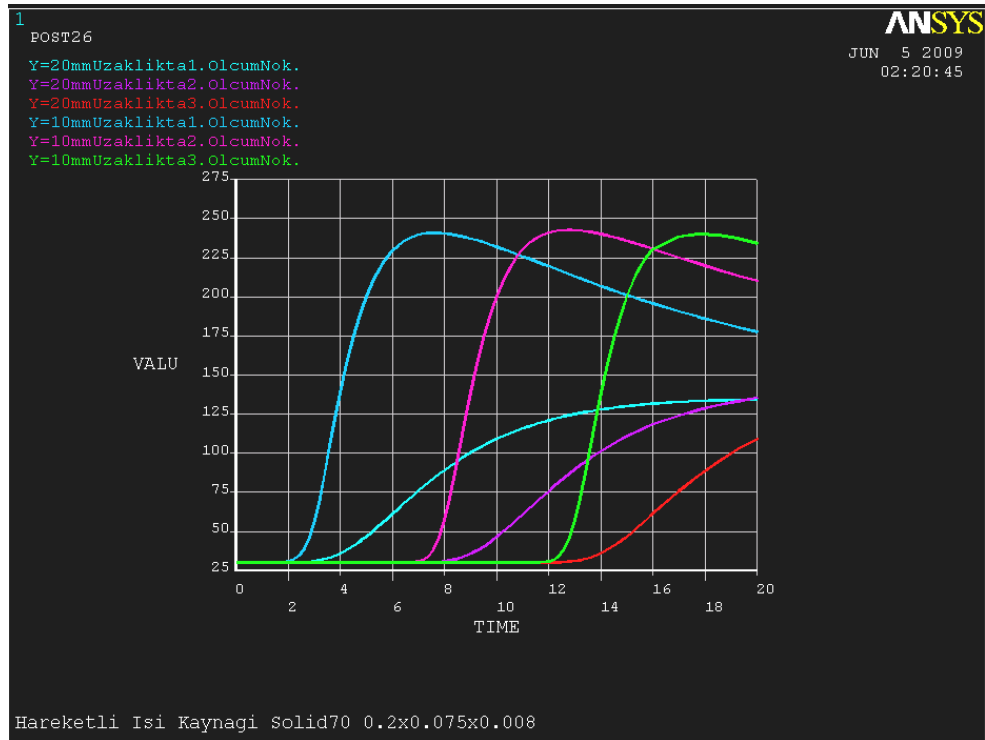
Şekil 5.34. Hareketli ısı kaynağından 20 mm uzaklıktaki 3. ölçüm noktası sıcaklık grafiği



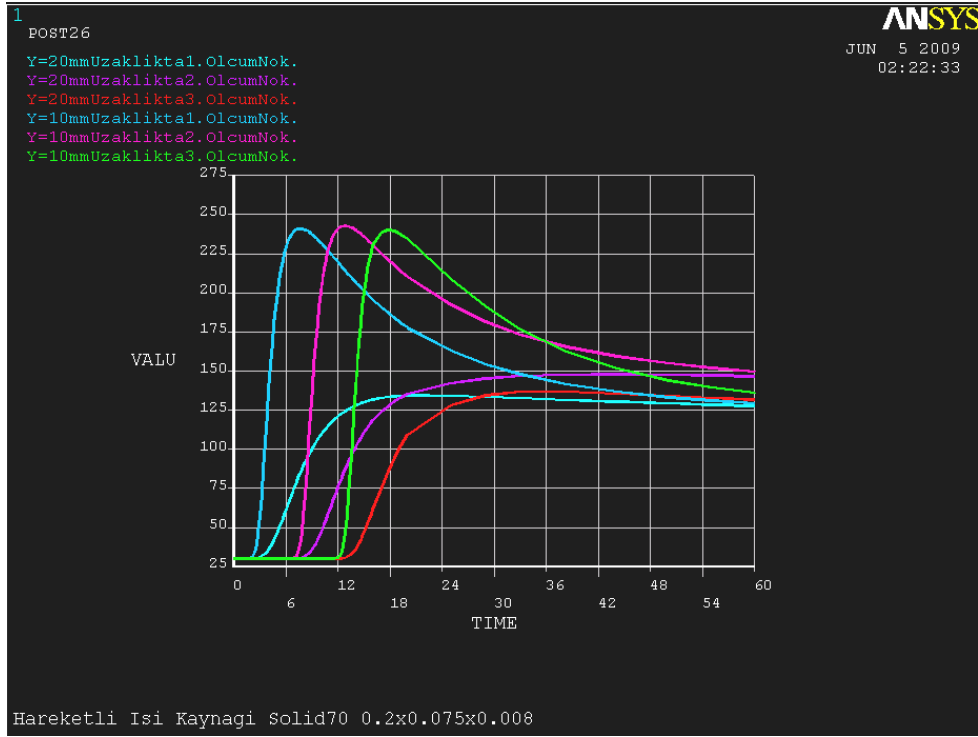
Şekil 5.35. Hareketli ısı kaynağından 20 mm uzaklıktaki 3 noktanın 60 sn'lik sıcaklık grafiği



Şekil 5.36. Hareketli ısı kaynağından 20 mm uzaklıktaki 3 noktanın 600 sn’lik sıcaklık grafiği



Şekil 5.37. Hareketli ısı kaynağından 20 mm ve 10 mm uzaklıktaki 6 noktanın 20 sn’lik sıcaklık grafiği



Şekil 5.38. Hareketli ısı kaynağından 20 mm ve 10 mm uzaklıktaki 6 noktanın 60 sn'lik sıcaklık grafiği

6. KAYNAK ANALİZ SONUÇLARININ KARŞILAŞTIRILMASI

Yapmış olduğum çalışma sonrası analitik hesaplamaların neler olduğu gösterilmiştir. Bununla birlikte deneysel olarak analiz yapılmıştır. Analitik hesaplamalarda gösterilen boyutsuz ifadeler yardımıyla noktasal ark kaynağı için gerekli olan denklemler gösterilmiştir. Bu denklemler ile deneysel olarak analiz edilen numune için örnek hesaplamalar yapılması sonucu bu iki analiz arasındaki fark şu şekildedir.

Pik noktasal sıcaklık analizi için analitik olarak verilen Denklem (3-11) ile (3-16) için deneysel olarak bulunan veriler hesaplanıldığında ark kaynak noktasından 20mm uzaklıktaki bir noktanın sıcaklık değerinin ne kadar zamanda soğuma gösterdiği incelenmiştir. Bu inceleme sonrasında ilk 10 sn için değerler birbirine çok yakın çıkmasına rağmen daha sonraki zaman diliminde değerler çok fazla farklılık göstermeye başlamıştır. Bunun sebebi olarak ise parça kalınlığının 8 mm olması sonucu malzeme üzerindeki ısı her iki taraftan da eşit oranda yayılacak kadar ortam ile dengeye gelmiş olmasıdır. (Tablo 6.1.)

Tablo (6.1.) de hesaplanan zaman dilimleri için ilk 10 saniyedeki 10 verinin sapma değeri ortalama 0,361 çıkmıştır. Diğer 60 sn lik zaman dilimi için ise soğuma süresindeki sapma değeri 0,911 çıkmıştır. Bu değerlere göre noktasal olarak yukarıda anlatılan deneysel düzenek ve analitik formüller yardımıyla herhangi bir mühendislik uygulaması için 20 mm uzaklıktaki bir noktanın soğuma süresi hesaplanırsa eğer yaklaşık olarak ilk 10 saniye içinde 0.361 sn hatalı hesaplama ihtimalimiz ortaya çıkmış olur. Daha sonraki soğuma süresi için ise 0.911 sn değerinde hatalı hesaplama yapmamız söz konusudur. Bu hesaplamalar yapılırken verilen ısı enerjisi deneysel düzenepteki kaynak makinesinin ısı enerjisidir. Bununla birlikte ANSYS ile çözümleme yapılan analizdeki malzemenin fiziksel özellikleri de bu analitik hesaplamada dikkate alınmıştır.

Tablo 6.1. Deneysel analizi ile analitik analiz sonrası elde edilen soğuma sürelerinin karşılaştırılması

Deneysel Zaman (sn)	Ölçülen Sıcaklık	Analitik hesaplanan soğuma zamanları (sn)
0	28,25	Isı artıyor
0,5	279,5	Isı artıyor
0,75	315,95	Isı artıyor
1	247	1,094381
2	171,4	1,673909
3	118,9	2,974464
4	84,45	4,671699
5	70,4	5,294933
6	64,95	5,717516
7	61,3	6,588616
8	58,15	7,602589
9	55,6	8,571194
10	54,35	9,31362
15	47,2	12,42987
20	44	23,29625
25	42	26,77656
30	40,55	31,03792
35	39,5	35,16867
40	38,65	39,8123
45	38,05	43,8111
50	37,5	48,85188
55	37,15	52,6562
60	36,65	59,11177

5. bölümde çizilen grafiklerde konu ile ilgili sıcaklık ölçü farklılıkları gösterilmiştir. ANSYS uygulamasında SOLID70 ile SOLID90 arasındaki fark değerleri ile ölçülen deneysel sıcaklık değerleri arasında ise genel anlamda farklılıklar vardır. Deneysel analiz için EXCEL’de ve Mathematicada hesaplanan denklemler ile ANSYS sonuçları hesaplanabilmektedir.

7. TARTIŞMA VE GÖRÜŞ

Yapılan analizlerde konunun daha iyi tartışılması için bulunan denklemler ile ilgili çalışmalar yapılması gerekmektedir. Farklı noktalar için farklı malzeme kalınlıkları ile ilgili analizler yapılarak bulunan değerler bu çalışma ile karşılaştırılabilir. Özellikle deneysel ve analitik hesaplamalar sonucu yapılan çalışmalar ile soğuma süresi karşılaştırılarak daha sonraki çalışmalara ışık tutabilir.

Sonlu eleman analizinde çıkan sonuçlar ile analitik hesaplamalar arasındaki farklılıklar karşılaştırılacak olursak eğer, sonlu eleman analizinde özellikle taşınım katsayısının ihmal edilmesi sonucu ortaya çıkan sıcaklık değişim aralıkları ve denge sıcaklık değeri deneyselle göre farklı çıkmıştır. Bunun nedenleri arasında ilk bakış da deneysel hatalar olan ölçüm toleransları gibi görünse de analitik hesaplamalarda bu konu çok fazla dikkat çekmiştir. Bunun sonucu olarak da ANSYS ile tekrardan daha detaylı bir çalışma yapılarak gerekli olan soğuma süresi hesabı için veriler incelenmelidir. Özellikle uygulanan ağ yapısı için farklı metodlar uygulanabilir. İç içe geçmiş dikdörtgen prizma yerine farklı olarak silindirik yapı uygulanarak kaynak noktasındaki ağ yapısı yoğunlaştırılabilir. Ağ yapısının yoğun olduğu bölge kare değil silindirik olabilir.

KAYNAKLAR DİZİNİ

- Anık,S., Dikicioğlu, A., Vural, M.,1999, İmal Usulleri, Birsen Yayınevi, 30-31
- Barsoum, Z., 2008, Residual Stress Analysis and Fatigue Assessment of Welded Steel Structures, Department of Aeronautical and Vehicle Engineering ,Stockholm,Doctoral Thesis
- Bos, E., 2007, Ark Esaslı Kaynak Yöntemleriyle Kaynak İşleminde Isı Tüketimi İle Malzeme/Kalınlık İlişkisinin İncelenmesi, Yıldız Teknik Üniversitesi Yüksek Lisans Tezi
- Böllinghaus, T., 2005,, Hot Cracking Phenomena In Welds, Springer,190-200
- Chaudhri, A.,Prang, M., Belson, B.E., 2007, Computer simulation and experimental verification of welding in thin steel sheet containment, International Journey Of Heat And Mass Transfer, 50, 4439-4445
- Çengel, Y. A., 2004, Heat Transfer A Practical Approach, Second Edition, McGraw-Hill Science Engineering, 459-515
- Deyev G.,Devey D.,2006, Surface Phenomena in Fusion Welding Processes, Taylor & Francis Group, 82,92
- Feng, Z.,2005 Processes and Mechanisms of Welding Residual Stres and Distorsion, Woodhead Publishing LTD,32-45
- Gonçalves, C.V., Vilarinho, L.O., Scotti, A., Guimaraes, G.,2006, Estimation of heat source and thermal efficiency in GTAW process by using inverse techniques, Journal Of Materials Processing Technology, 172, 42-51
- Grong,Φ, 1996, Metallurgical Modelling Of Welding, Materials Modelling Series, Norwegian University Of Science and Technology, The Institute Of Materials, 1-10
- Incropera, F.P.,Dewitt, D. P.,2001,(Çev.T. Derbentli, 2001),Isı ve Kütle Geçisi,Literatür Yayınları
- Julian, P., 2003, Arc Welding Control, Woodhead Publishing LTD, 411-525
- Kermanpur, A., Shamanian, M., Esfahani Yeganeh, V., 2008, Three-Dimensional

Thermal Simulation and Experimental Investigation of GTAW
Circumferentially Butt-Welded Incoloy 800 Pipes, Journal of Materials
Processing Technology 199 (295–303)

Kou, S., 2003, Welding metallurgy, Second Edition, Wiley Interscience Publication,
32-64

Lancaster, J., 1999, F., Metallurgy Welding, Sixth Edition, Abington Publishing, 147-
165

Lv, S., Song, J., Wang, H., Yang, S., 2008, Materials Science and Engineering A,
Temperature Field And Flow Field During Tungsten Inert Gas Bead Welding
Of Copper Alloy Onto Steel,

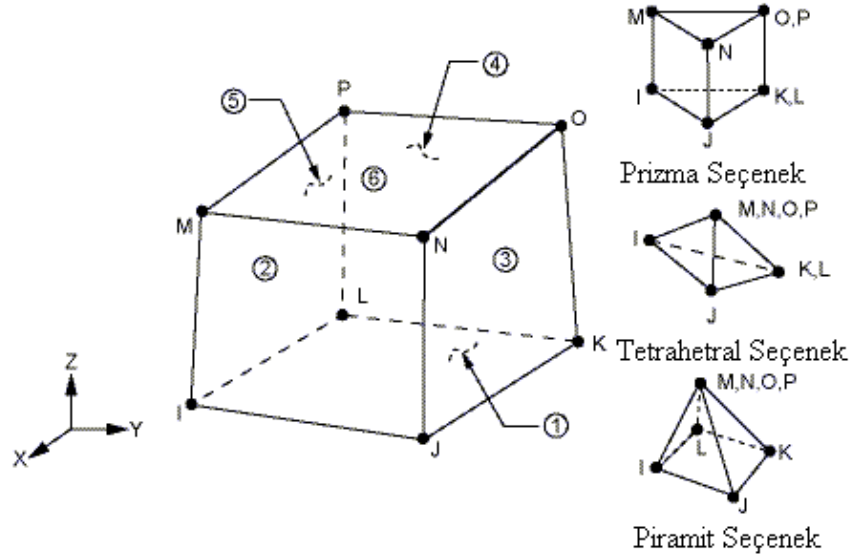
Weman, K., 2003, Welding Process Handbook, Woodhead Publishing LTD, 1-13

EK AÇIKLAMALAR-A

ANSYS SOLID70 ve SOLID90 Element Yapısı Özellikleri

1- SOLID70 Özellikleri

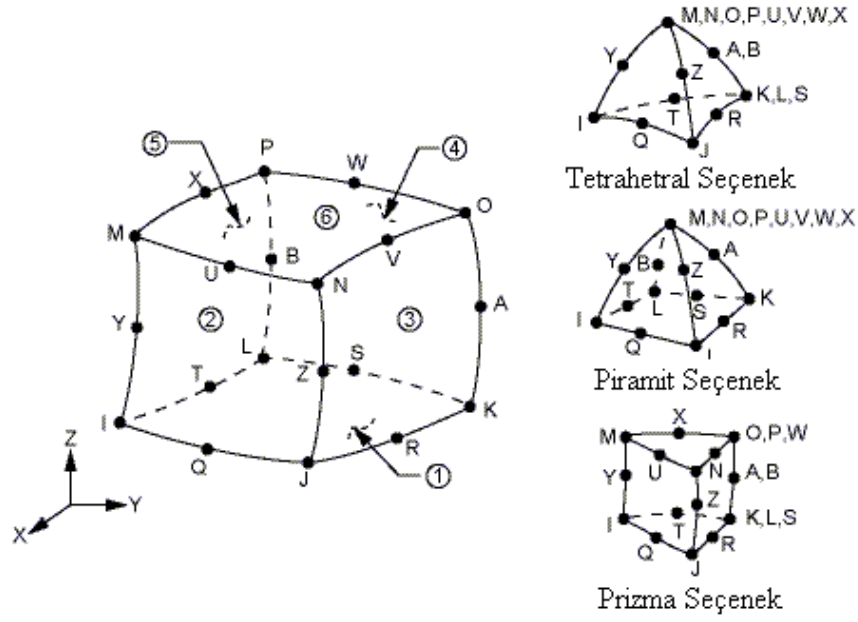
3 Boyutlu iletimsel kapasiteye sahiptir, 8 adet toplam düğüm noktası vardır. Sıcaklık ve serbestlik derecesi yükleri bu düğüm noktalarının hepsine uygulanabilir.



Şekil Ek1.1. SOLID90 element yapısının gösterimi

2- SOLID90 Özellikleri

Uç boyutlu termal analiz için SOLID70'den daha fazla gelişmiştir. Toplam 20 adet düğüm noktası mevcuttur.



Şekil Ek1.2. SOLID90 element yapısının gösterimi

EK AÇIKLAMALAR – B

ANSYS Kodları

A- Noktasal Pik Sıcaklık Analizi Kodları

```
/title,Kaynak Arki Sıcaklık Analizi Solid70 0.2x0.075x0.008
/filnam,Kaynak Arki Sıcaklık Analizi
/TRIAD,RBOT
```

```
/PREP7
TOFFST,273
BLOCK,0.08,0.12,0.0175,0.0575,0,0.008,
BLOCK,0.00,0.2,0.00,0.075,0,0.008,
```

```
FLST,2,2,6,ORDE,2
FITEM,2,1
FITEM,2,-2
VSBV,P51X,1
```

```
BLOCK,0.08,0.12,0.0175,0.0575,0,0.008,
```

```
FLST,2,2,6,ORDE,2
FITEM,2,1
FITEM,2,3
VGLUE,P51X
```

```
aplot
```

```
ET,1,SOLID70
KEYOPT,1,2,0
KEYOPT,1,4,0
KEYOPT,1,7,0
KEYOPT,1,8,0
```

```
UIMP,1,DENS,,7850,
MPTEMP,1,0,250,500,750,1000,1250
MPDATA,KXX,1,1,50,45,40,35,30,25
MPDATA,KYY,1,1,50,45,40,35,30,25
MPDATA,KZZ,1,1,50,45,40,35,30,25
```

```
MPTEMP,7,1500,1750,2000
MPDATA,KXX,1,7,60,160,300
MPDATA,KYY,1,7,60,160,300
MPDATA,KZZ,1,7,60,160,300
```

```
MPTEMP,1,0,250,500,750,1000,1250
MPDATA,C,1,1,450,550,660,1150,660,660
```

```
MPTEMP,7,1500,1750,2000
MPDATA,C,1,7,1400,750,800
```

```
type,1
mat,1
ESIZE,0.001,
MSHKEY,1
vmesh,1
```

```
ESIZE,0.01,0,
MSHAPE,1,3D
```

```

MSHKEY,0
!*
CM,_Y,VOLU
VSEL,,,2
CM,_Y1,VOLU
CHKMSH,'VOLU'
CMSEL,S,_Y
!*
VMESH,_Y1
!*
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
CMDELE,_Y2
finish

/SOLU
ANTYPE,trans
TRNOPT,FULL
NROPT,AUTO, ,
EQLV,
SOLCONTROL,ON
AUTOTS,on
KBC,1
OUTRES,ALL,ALL,

TIME,0.01
DELTIM,0.01,0.01,0.01
Tunif,30,
solve

TIME, 0.30
DELTIM,.02,.018,.022,

SFE,11981,6,HFLUX, ,3800/0.001/0.001, , ,

SOLVE

SFEDELE,11981,6,HFLUX

TIME,10
DELTIM,1,0.8,1.2
ep\ot
solve

TIME,60
DELTIM,5,4,6
ep\ot
solve

```

B- Hareketli Isı Kaynağı Analizi Kodları

```
/title,Hareketli Isi Kaynagi Solid70 0.2x0.075x0.008
/filnam,Hareketli Isi Kaynagi Analizi
/TRIAD,ROBOT
```

```
/PREP7
TOFFST,273
BLOCK,0.02,0.18,0.0175,0.0575,0,0.008,
BLOCK,0.00,0.2,0.00,0.075,0,0.008,
```

```
FLST,2,2,6,ORDE,2
FITEM,2,1
FITEM,2,-2
VSBV,P51X,1
```

```
BLOCK,0.02,0.18,0.0175,0.0575,0,0.008,
```

```
FLST,2,2,6,ORDE,2
FITEM,2,1
FITEM,2,3
VGLUE,P51X
```

```
aplot
```

```
ET,1,SOLID70
```

```
KEYOPT,1,2,0
KEYOPT,1,4,0
KEYOPT,1,7,0
KEYOPT,1,8,0
```

```
UIMP,1,DENS,,7850,
MPTEMP,1,0,250,500,750,1000,1250
MPDATA,KXX,1,1,50,45,40,35,30,25
MPDATA,KYY,1,1,50,45,40,35,30,25
MPDATA,KZZ,1,1,50,45,40,35,30,25
```

```
MPTEMP,7,1500,1750,2000
MPDATA,KXX,1,7,60,160,300
MPDATA,KYY,1,7,60,160,300
MPDATA,KZZ,1,7,60,160,300
```

```
MPTEMP,1,0,250,500,750,1000,1250
MPDATA,C,1,1,450,550,660,1150,660,660
```

```
MPTEMP,7,1500,1750,2000
MPDATA,C,1,7,1400,750,800
```

```
type,1
mat,1
ESIZE,0.002,
MSHKEY,1
vmesh,1
```

```
ESIZE,0.01,0,
MSHAPE,1,3D
MSHKEY,0
!*
CM,_Y,VOLU
VSEL,, , ,2
```

```

CM,_Y1,VOLU
CHKMSH,'VOLU'
CMSEL,S,_Y
!*
VMESH,_Y1
!*
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
CMDELE,_Y2
finish

/SOLU
ANTYPE,trans
TRNOPT,FULL
NROPT,AUTO,,
EQLV,ITER,4
SOLCONTROL,ON
AUTOTS,on
KBC,1
OUTRES,ALL,ALL,

TIME,0.01
DELTIM,0.01,0.01,0.01
Tunif,30,
solve

J=0.2
*DO,i,5521,5600,1
TIME,j
DELTIM,0.2,0.175,0.2,

SFEDELE,i-1,6,HFLUX
SFE,i,6,HFLUX,,2935/0.002/0.002,,

ep\ot
solve
j=j+0.2
*ENDDO

SFEDELE,5600,6,HFLUX

TIME,20
DELTIM,1,0.75,1.25
ep\ot
solve

TIME,60
DELTIM,5,4,6
ep\ot
solve

TIME,120
DELTIM,10,8,12
ep\ot
solve

TIME,240
DELTIM,20,16,24
ep\ot
solve

TIME,600
DELTIM,30,26,34
ep\ot
solve

```

Kaynak İşlemi Sırasında Isı Geçişinin Deneysel Ve Teorik Analizi

Serkan Leblebici

YÜKSEK LİSANS TEZİ

EKLER

EK-1 Mathematica Hesapları ve Komutları

EK-2 Ansys Video Görüntüleri

EK-3 Deney Video Görüntüleri

Haziran 2009

Pik sıcaklık verileri

```
data = {{0, 28.25}, {0.5, 279.5}, {0.75, 315.95}, {1, 247}, {2, 171.4},  
        {3, 118.9}, {4, 84.45}, {5, 70.4}, {6, 64.95}, {7, 61.3}, {8, 58.15},  
        {9, 55.6}, {10, 54.35}, {15, 47.2}, {20, 44}, {25, 42}, {30, 40.55},  
        {35, 39.5}, {40, 38.65}, {45, 38.05}, {50, 37.5}, {55, 37.15}, {60, 36.65}};
```

1. dereceden denklemi

```
line = Fit[data, {1, t}, t]
```

129.209 - 2.22689 t

2. dereceden denklemi

```
parabola = Fit[data, {1, t, t^2}, t]
```

162.854 - 8.46438 t + 0.11605 t²

5. Dereceden Ana denklem

```
equation = Fit[data, {1, t, t^2, t^3, t^4, t^5}, t]
```

221.871 - 36.0394 t + 2.53962 t² - 0.0808635 t³ + 0.00118664 t⁴ - 6.53113 × 10⁻⁶ t⁵

Örnek zamanlar için hesaplamalar

t = 2.1

221.8714163494317` - 36.039420596339056` t + 2.5396180342460335` t² -
0.08086349029484502` t<sup>3</sup> + 0.0011866391667149387` t⁴ - 6.531126346195597`*^-6 t⁵

t = 13.1

221.8714163494317` - 36.039420596339056` t + 2.5396180342460335` t² -
0.08086349029484502` t<sup>3</sup> + 0.0011866391667149387` t⁴ - 6.531126346195597`*^-6 t⁵

t = 24.1

221.8714163494317` - 36.039420596339056` t + 2.5396180342460335` t² -
0.08086349029484502` t<sup>3</sup> + 0.0011866391667149387` t⁴ - 6.531126346195597`*^-6 t⁵

t = 35.1

221.8714163494317` - 36.039420596339056` t + 2.5396180342460335` t² -
0.08086349029484502` t<sup>3</sup> + 0.0011866391667149387` t⁴ - 6.531126346195597`*^-6 t⁵

t = 46.1

221.8714163494317` - 36.039420596339056` t + 2.5396180342460335` t² -
0.08086349029484502` t<sup>3</sup> + 0.0011866391667149387` t⁴ - 6.531126346195597`*^-6 t⁵

2.1

156.662

13.1

36.2172

24.1

43.6723

35.1

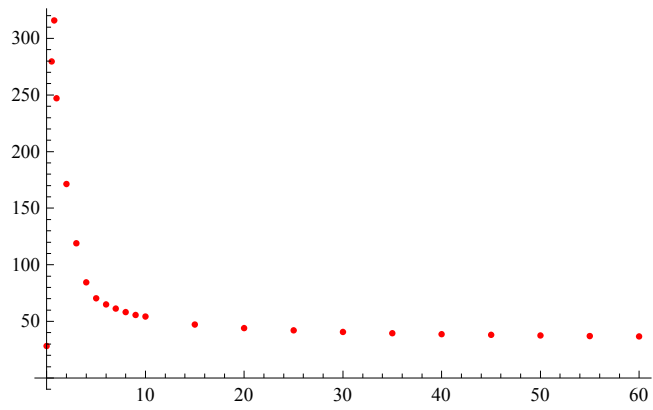
42.0813

46.1

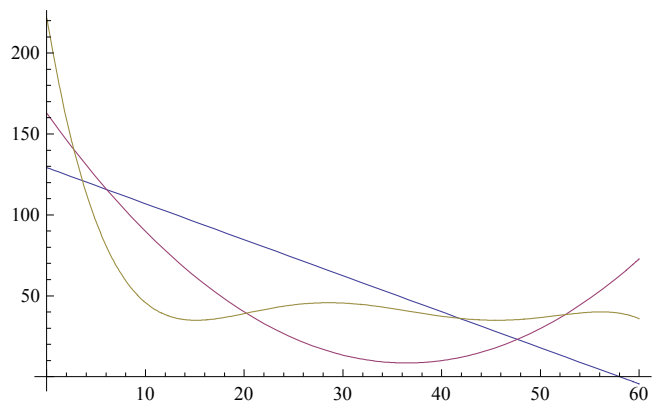
34.9245

Noktaların gösterimi

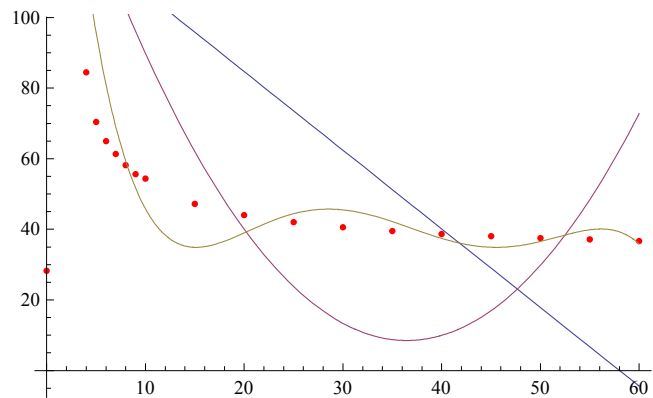
```
gp = ListPlot[data, PlotStyle → Red]
```



```
Plot[{line, parabola, equation}, {t, 0, 60}]
```



```
Show[ListPlot[data, PlotStyle → Red], Plot[{line, parabola, equation}, {t, 0, 60}]]
```



Hareketli Isı Kaynağı Sıcaklık Verileri

1. Ölçüm noktası (0 - 20 sn için)

```
In[1]:= N1 = {{0, 27.3}, {0.5, 35.9}, {1, 80.9}, {2, 188.3}, {3, 296},  
            {4, 300}, {5, 288}, {6, 252}, {7, 245}, {8, 230}, {9, 219.8}, {10, 202.8},  
            {11, 193.8}, {12, 185.2}, {13, 179.9}, {14, 173.7}, {15, 169.7},  
            {16, 166.8}, {17, 164.8}, {18, 162.8}, {19, 160.5}, {20, 158.4}};
```

1. dereceden denklemi

```
In[3]:= N1line = Fit[N1, {1, t}, t]
```

```
Out[3]= 182.044 + 0.364025 t
```

2. dereceden denklemi

```
In[6]:= N1parabola = Fit[N1, {1, t, t^2}, t]
```

```
Out[6]= 110.636 + 25.3813 t - 1.28739 t^2
```

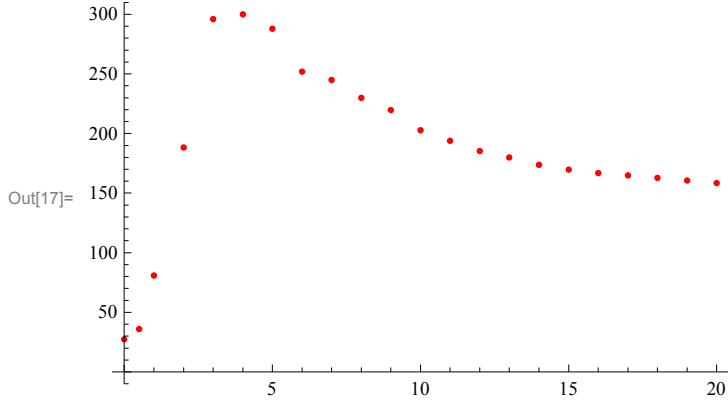
9. Dereceden Ana denklem

```
In[16]:= N1equation = Fit[N1, {1, t, t^2, t^3, t^4, t^5, t^6, t^7, t^8, t^9}, t]
```

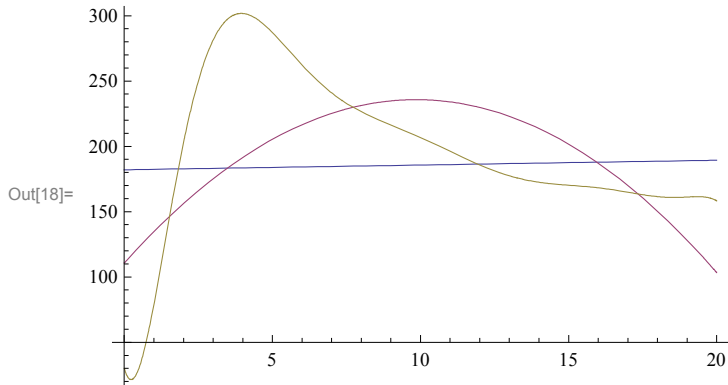
```
Out[16]= 30.0143 - 78.2196 t + 196.921 t^2 - 85.3152 t^3 + 17.6339 t^4 -  
        2.08474 t^5 + 0.148648 t^6 - 0.00632898 t^7 + 0.000148323 t^8 - 1.47314 × 10-6 t^9
```

Noktaların gösterimi

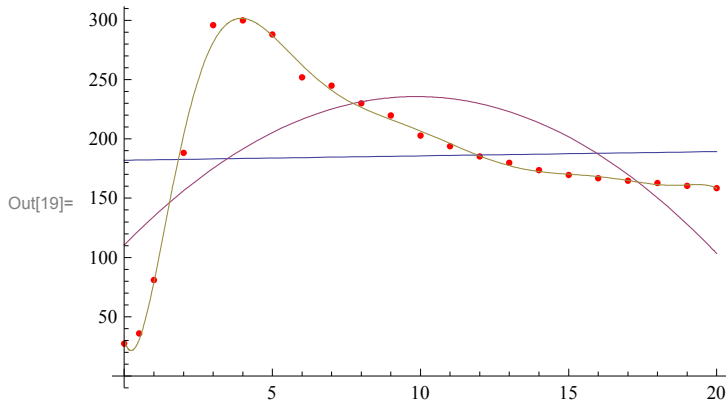
```
In[17]:= gp = ListPlot[N1, PlotStyle → Red]
```



```
In[18]:= Plot[{N1line, N1parabola, N1equation}, {t, 0, 20}]
```



```
In[19]:= Show[ListPlot[N1, PlotStyle → Red], Plot[{N1line, N1parabola, N1equation}, {t, 0, 20}]]
```



2. Ölçüm noktası (0 - 20 sn için)

```
In[488]:= N2 = {{0, 30.6}, {0.5, 30.8}, {1, 31}, {2, 31.3}, {3, 31.6},
  {4, 32.4}, {5, 36.8}, {6, 68.2}, {7, 290}, {8, 259}, {9, 249}, {10, 228.8},
  {11, 198.6}, {12, 190.8}, {13, 183.9}, {14, 177.9}, {15, 173.8},
  {16, 171.9}, {17, 169.1}, {18, 167.2}, {19, 165.4}, {20, 162.8}};
```

1. dereceden denklemi

```
In[110]:= N2line = Fit[N2, {1, t}, t]
```

Out[110]= 60.9741 + 8.26351 t

2. dereceden denklemi

```
In[111]:= N2parabola = Fit[N2, {1, t, t^2}, t]
```

Out[111]= -12.1413 + 33.8788 t - 1.31817 t²

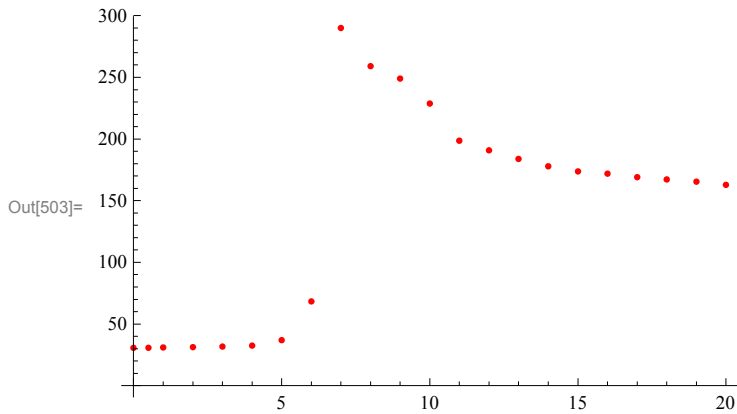
20. Dereceden Ana denklem

```
In[514]:= N2equation = Fit[N2, {1, t, t^2, t^3, t^4, t^5, t^6, t^7, t^10, t^11, t^20}, t]
```

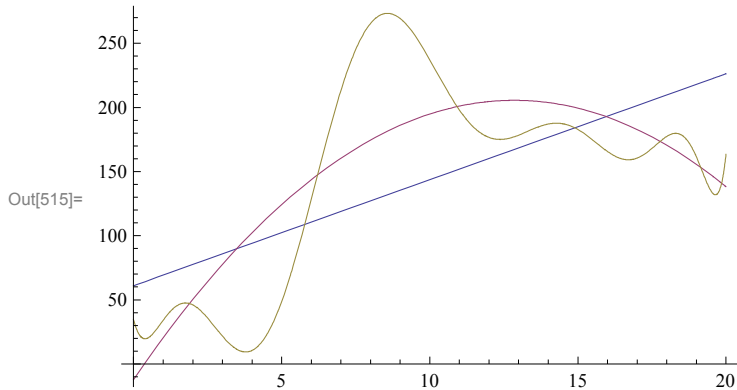
Out[514]= 34.5367 - 89.4272 t + 167.866 t² - 104.303 t³ + 29.2128 t⁴ - 4.12272 t⁵ +
0.296617 t⁶ - 0.00909157 t⁷ + 4.23407 × 10⁻⁷ t¹⁰ - 1.17879 × 10⁻⁸ t¹¹ + 1.9106 × 10⁻²² t²⁰

Noktaların gösterimi

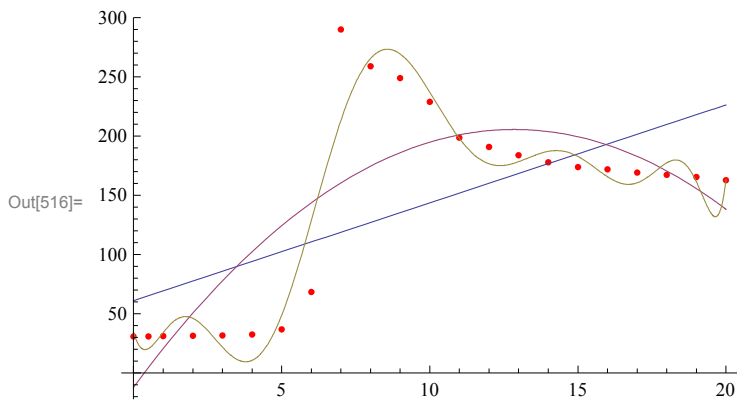
```
In[503]:= gp = ListPlot[N2, PlotStyle → Red]
```



```
In[515]:= Plot[{N2line, N2parabola, N2equation}, {t, 0, 20}]
```



```
In[516]:= Show[ListPlot[N2, PlotStyle -> Red], Plot[{N2line, N2parabola, N2equation}, {t, 0, 20}]]
```



3. Ölçüm noktası (0 - 20 sn için)

```
In[321]:= N3 = {{0, 28}, {0.5, 28}, {1, 28.8}, {2, 28.3}, {3, 28.3}, {4, 28.2},
               {5, 28.3}, {6, 28.5}, {7, 28.6}, {8, 29.2}, {9, 30.1}, {10, 36.1},
               {11, 137.8}, {12, 284.3}, {13, 269.3}, {14, 258.9}, {15, 228.9},
               {16, 209.8}, {17, 192.9}, {18, 185.8}, {19, 179.8}, {20, 175.2}};
```

1. dereceden denklemi

```
In[322]:= N3line = Fit[N3, {1, t}, t]
```

Out[322]= $-3.80775 + 12.1467 t$

2. dereceden denklemi

```
In[323]:= N3parabola = Fit[N3, {1, t, t^2}, t]
```

Out[323]= $-10.0847 + 14.3457 t - 0.113165 t^2$

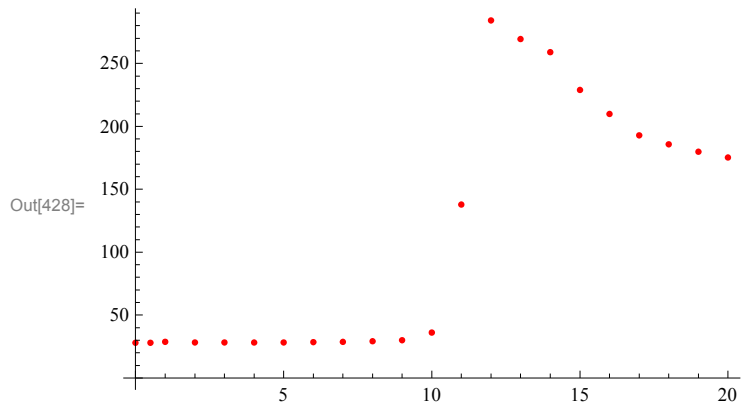
21. Dereceden Ana denklem

```
In[427]:= N3equation =
Fit[N3, {1, t, t^2, t^3, t^4, t^5, t^6, t^7, t^8, t^9, t^10, t^14, t^16, t^21}, t]
```

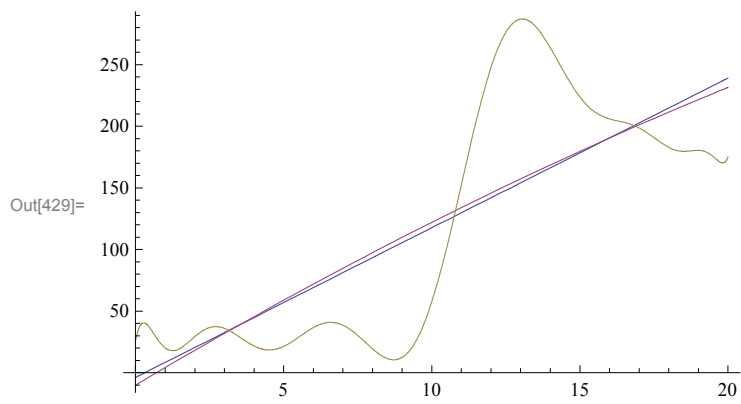
Out[427]= $26.045 + 124.12 t - 344.614 t^2 + 347.134 t^3 - 175.27 t^4 +$
 $50.8199 t^5 - 9.03282 t^6 + 1.00782 t^7 - 0.0695728 t^8 + 0.00275912 t^9 -$
 $0.0000492442 t^{10} + 2.2067 \times 10^{-11} t^{14} - 2.00737 \times 10^{-14} t^{16} + 2.47844 \times 10^{-22} t^{21}$

Noktaların gösterimi

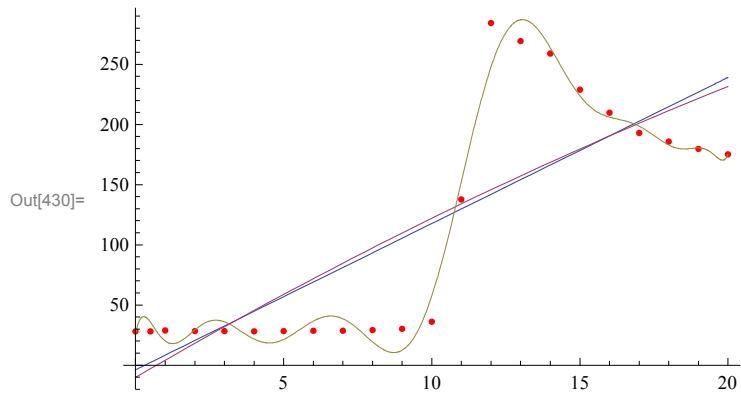
In[428]:= **gp = ListPlot[N3, PlotStyle → Red]**



In[429]:= **Plot[{N3line, N3parabola, N3equation}, {t, 0, 20}]**



In[430]:= **Show[ListPlot[N3, PlotStyle → Red], Plot[{N3line, N3parabola, N3equation}, {t, 0, 20}]]**



Ortak gösterimi

```
In[517]:= Show[Plot[{N1equation, N2equation, N3equation}, {t, 0, 20}]]
```

