

126708

T.C. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU
DOKÜMENTASYON MERKEZİ

**POLİETİLEN DOĞALGAZ BORULARININ
ELEKTROFÜZYON YÖNTEMİ İLE BİRLEŞTİRİLMESİNİN
ISIL ANALİZİNİN TEORİK ve DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ**

DOKTORA TEZİ
Y. Müh. Erdoğan TOZAN
(503932017)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 23 Mart 2001
Tezin Savunulduğu Tarih : 09 Ocak 2002

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Murat TUNÇ (İ.T.Ü)

Diğer Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Ahmet KARAKAŞ (İ.T.Ü)

Prof. Dr. Hasan HEPERKAN (Y.T.Ü)

Prof. Dr. Salim ÖZÇELEBİ (İ.Ü)

Prof. Dr. Adnan DİKİCİOĞLU (İ.T.Ü)

OCAK 2002

126708

ÖNSÖZ

Bu çalışmanın hazırlanması aşamasında devamlı yol gösteren, her türlü yardım ve tavsiyelerini esirgemeyen hocam Sn. Prof. Dr. Murat TUNÇ'a, çalışmalarına destek veren ve sabır gösteren aileme ve çalışma arkadaşlarıma teşekkürlerimi bir borç bilirim.

Mart 2001, İstanbul

Erdoğan TOZAN

ÖNSÖZ	ii
İÇİNDEKİLER	iii
KISALTMALAR	v
TABLO LİSTESİ	vi
ŞEKİL LİSTESİ	viii
SEMBOL LİSTESİ	ix
ÖZET	x
SUMMARY	xii
1. GİRİŞ	1
2. PLASTİKLER ve POLİETİLEN	6
2.1. Plastiklerin Yapısı ve Sınıflandırılması	6
2.2. Polietilenin Isıl Özellikleri	8
2.3 Polietilen Borular	11
3. PLASTİKLERİN BİRLEŞTİRİLME METODLARI	14
3.1. Genel Sınıflandırma	14
3.2. Sıcak Gaz Kaynağı	14
3.3. Sıcak Levha Kaynağı	15
3.4. Dielektrik Kaynak	16
3.5. İndüksiyon Kaynağı	17
3.6. Elektrofüzyon (Direnç) Kaynağı	17
3.7. Sürtünme Kaynağı	17
3.8. Titreşim Kaynağı	18
3.9 Ultrasonik Kaynak	20
4. ELEKTROFÜZYON KAYNAK YÖNTEMİ	22
4.1. Elektrofüzyon Bağlantı Elemanları	22
4.2. Elektrofüzyon Kaynak İşleminin Uygulanışı	25
4.3. Polietilen Kaynak Mekanizması	27
4.4. Literatür Araştırması	28
5. ELEKTROFÜZYON KAYNAĞI MATEMATİK MODELİ	38
5.1. Sistem Tayini ve Genel Enerji Denklemi	38
5.2. Faz Değişimi	40
5.3. Başlangıç ve Sınır Koşulları	47
6. SAYISAL ÇÖZÜM	49
6.1. Sayısal Çözüm için Problemin Tanımı	49
6.2. Elektrofüzyon Manşon Boru Kaynağı Geometrik Modeli	49
6.3. Genel Enerji Denklemine Göre Sayısal Çözüm	50
6.4. Entalpi Yöntemine Göre Sayısal Çözüm	53
6.5. ANSYS Programı ile Sayısal Çözüm	56
6.6. Teller Arası Isı İletimi	57
6.7. Teorik Analizde Kullanılan Parametreler	58

6.8. Teorik Analizden Elde Edilen Sonuçlar	59
6.9. Isı Üretimi İçin Tellere Verilen Enerji	63
7. DENEYSEL ÇALIŞMA	66
7.1. Deney Tesisatı	66
7.2. Deney Düzenğinde Kullanılan Ekipman ve Ölçme Aletleri	68
7.2.1. Güç Kaynağı	68
7.2.2. A/D (Analog / Digital) Konvertör	68
7.2.3. Akım ve Gerilim Ölçümü	68
7.2.4. Sıcaklık Ölçümü	69
7.3. Deneyisel Ölçümlerden Yapılan Tespitler	70
8. SONUÇLAR VE TARTIŞMA	76
8.1. Teorik ve Deneyisel Sonuçların Karşılaştırılması	76
8.2. Sonuçlar ve Tartışma	78
KAYNAKLAR	82
EKLER	85
ÖZGEÇMİŞ	92

KISALTMALAR :

PE	: polietilen
PB	: polibütan
PP	: polipropilen
PVC	: polivinilkloroid
PS	: polistiren
PF	: fenol formaldehit
EP	: epoksi reçine
UP	: polyester reçine
GFK	: cam fiber plastik
NR	: tabii kauçuk
EPDM	: etilen propilen kauçuk
CR	: klopren kauçuk
SIR	: silikon kauçuk
PE80	: çevresel gerilme dayanımı minimum 8 MPa olan polietilen
PE100	: çevresel gerilme dayanımı minimum 10 MPa olan polietilen
MDPE	: orta yoğunluklu polietilen
HDPE	: yüksek yoğunluklu polietilen
MRS	: minimum gerekli mukavemet
PMS	: müsaade edilebilir maksimum işletme basıncı
SDR	: standart boyut oranı (nominal dış çap/et kalınlığı)
r.m.s	: karelerin ortalama karekökü, alternatif akımın eşdeğer doğru akım karşılığı

TABLO LİSTESİ :

Tablo 2.1. Çeşitli polietilenler için erime sıcaklık aralığı ve faz değişim ısıları

Tablo A.1. 63 mm polietilen boru manşon elektrofüzyon kaynağında teller arası ısı iletiminin merkez ve yan tellere etkisi

Tablo A.2. Sayısal çözümlerin karşılaştırılması

Tablo A.3. 63 mm polietilen boru manşon kaynağı için sayısal çözüm ve deneysel ölçümlerin karşılaştırılması



ŞEKİL LİSTESİ :**sayfa no :**

Şekil 2.1. Plastiklerin sınıflandırılması	7
Şekil 2.2. Plastiklerde makromolekül zincir yapısı	7
Şekil 2.3. Polietilenin ısı iletim katsayısının sıcaklıkla değişimi	8
Şekil 2.4. Polietilenin özgül ısı değerinin sıcaklıkla değişimi	9
Şekil 2.5. Polietilenin özgül entalpisinin sıcaklıkla değişimi	9
Şekil 2.6. Polietilenin yoğunluğunun sıcaklıkla değişimi	10
Şekil 2.7. PE 80 polietilen için çeşitli çalışma şartlarında servis ömrü	11
Şekil 3.1. Sıcak levha kaynağında basınç zaman süreçleri	16
Şekil 3.2. Sürtünme kaynağı geometrisi ve uygulanışı	18
Şekil 3.3. Titreşim kaynağı uygulanışı	19
Şekil 3.4. Titreşim kaynağı aşamaları ve kaynak nüfuziyeti	19
Şekil 3.5. Ultrasonik kaynakta bağlantı şekilleri	20
Şekil 4.1. Elektrofüzyon manşonun yapısı	22
Şekil 4.2. Çeşitli elektrofüzyon bağlantı elemanları	23
Şekil 4.3. Elektrofüzyon bransman T ve manşonda tellerin yerleşiminin X ışını altında görünüşü	24
Şekil 4.4. Elektrofüzyon kaynağında uygulanan elektrik geriliminin osilaskopta görünüşü	25
Şekil 4.5. Elektrofüzyon kaynağı aşamaları	26
Şekil 4.6. Polietilen füzyon kaynağında moleküler difüzyonla bağların oluşumu ...	27
Şekil 4.7. Polietilen borunun elektrofüzyon kaynağı için bir boyutlu model ile deneysel ve sayısal sonuçların karşılaştırılması[5]	28
Şekil 4.8. Polietilen levhanın iyi kaynak edilebilirliği[6]	29
Şekil 4.9. Lineer ve lineer olmayan model sonuçlarının karşılaştırılması[7]	31
Şekil 4.10. Deney parçası için ölçümlerle sayısal çözümlerin karşılaştırılması[7] ..	31
Şekil 4.11. Basitleştirilmiş elektrofüzyon modellemesi[8]	32
Şekil 4.12. Kaynak kalitesinin belirlenmesi için sayısal çözüm sonuçları[8]	32
Şekil 4.13. Polietilen 50 mm çapındaki manşon boru kaynağı için sayısal ve deneysel sonuçların uyumu[12]	33
Şekil 4.14. Elektrofüzyon 4" manşon boru kaynağı için sayısal ve deneysel sonuçların karşılaştırılması[35]	34
Şekil 4.15. Elektrofüzyon kaynak mukavemeti için kayma testinin şematik görünüşü[32]	34
Şekil 4.16. 4" çapındaki polietilen boru manşon kaynağı için değişik güçlerde zamanın fonksiyonu olarak hesaplanan maksimum sıcaklıklar[10]	35
Şekil 4.17. Isıtma periyodu için deneysel ve teorik sonuçların karşılaştırılması[11]	36
Şekil 4.18. Elektrofüzyon manşon boru kaynağı etki eden iç basınç ve gerilmeler[37]	37
Şekil 4.19. 4" çapındaki boru manşon kaynağı için soğuk kısımdaki 0,1" boyundaki başlangıç çatlağı için çeşitli çalışma basınçlarında çatlak ilerlemesi servis ömrü[37]	37
Şekil 5.1. Elektrofüzyon manşon ve polietilen boru montajı ve sistem seçimi	38
Şekil 5.2. Faz değişimi problemi sistem ve yükler	41
Şekil 5.3. Polietilen için entalpi fonksiyonu	43
Şekil 5.4. Volumetrik entalpinin sıcaklıkla değişimi	46

Şekil 6.1. Elektrofüzyon manşon ve polietilen boru montajı	50
Şekil 6.2. Genel enerji denkleminde göre elektrofüzyon kaynağında çeşitli noktaların sıcaklıklarının zamanla değişimi	52
Şekil 6.3. Polietilen birim hacmi için entalpinin sıcaklıkla değişimi	53
Şekil 6.4. Entalpi metoduna göre elektrofüzyon kaynağında çeşitli noktaların sıcaklıklarının zamanla değişimi	55
Şekil 6.5. Polietilen boru manşon elektrofüzyon kaynağı sıcaklık zaman grafiği ...	59
Şekil 6.6. Elektrofüzyon kaynağında enerjinin kesildiği anda kesitteki sıcaklık dağılımı	60
Şekil 6.7. 63 mm polietilen boru manşon elektrofüzyon kaynağında eriyen bölgenin gelişimi	61
Şekil 6.8. 63 mm polietilen boru manşon elektrofüzyon kaynağında teller arası ısı iletiminin tel sıcaklığına etkisi	62
Şekil 6.9. Teller arası ısı iletimi olmaksızın tel sıcaklıklarının durumu	63
Şekil 6.10. 63 mm polietilen boru manşon elektrofüzyon kaynağında tel direncinin zamanla değişimi	64
Şekil 6.11. 63 mm polietilen boru manşon elektrofüzyon kaynağında çekilen gücün zamanla değişimi	65
Şekil 6.12. 63 mm polietilen boru manşon elektrofüzyon kaynağında çekilen akımın zamanla değişimi	65
Şekil 7.1. Deney düzeneği blok diyagramı	67
Şekil 7.2. Deney düzeneği genel görünüşü	67
Şekil 7.3. Termokuplların buzlu su ve kaynayan su sıcaklık kalibrasyonu	69
Şekil 7.4. Polietilen boru ve elektrofüzyon manşon kaynağı kesiti	70
Şekil 7.5. Polietilen boru manşon ara yüzeyine termokuplların yerleşimi	70
Şekil 7.6. Deneysel çalışmada kullanılan polietilen boru ve manşonlar	71
Şekil 7.7. Termokupl ara yüzeyden uzaklaşarak polietilen boru içerisine kayması .	71
Şekil 7.8.a Isıtıcı teller ara yüzeye paralel kalarak yerlerini koruyor	72
Şekil 7.8.b Isıtıcı tellerin eksenel doğrultuda her iki yana eriyen polietilenle birlikte hareketi	72
Şekil 7.8.c Isıtıcı tellerin radyal doğrultuda dışa doğru ara yüzeyden uzaklaşması .	72
Şekil 7.9 Et kalınlığı düşük (SDR 17,6) polietilen boru ile et kalınlığı fazla (SDR 11) manşon kaynağı sonrası füzyon bölgesinde ince olan borunun dışa doğru çıkması	73
Şekil 7.10.a Boru montajında uçların füzyon bölgesinde kalması	73
Şekil 7.10.b Elektrofüzyon manşon orta kısmında tel sarımının devam etmesi sonucu soğuk bölge olmaması	73
Şekil 7.11 63 mm polietilen boru manşon elektrofüzyon kaynağı sıcaklık ölçümleri	75
Şekil 8.1. Sayısal çözümlerin karşılaştırılması	76
Şekil 8.2. Sayısal çözümlerle deneysel ölçümlerin karşılaştırılması	77
Şekil 8.3. Büyük çaplı elektrofüzyon manşonlar için önerilen ısıtıcı tel sarım şekli	79
Şekil 8.4. 110 mm çapındaki polietilen boru manşon elektrofüzyon kaynağı sıcaklık değişimleri	79
Şekil 8.5. 110 mm çapındaki polietilen boru manşon elektrofüzyon kaynağında çekilen gücün zamanla değişimi	80
Şekil 8.6. 110 mm çapındaki polietilen boru manşon elektrofüzyon kaynağında Isıtıcı tel direncinin zamanla değişimi	81
Şekil 8.7. 110 mm çapındaki polietilen boru manşon elektrofüzyon kaynağında çekilen akımın zamanla değişimi	81

SEMBOL LİSTESİ :

A	: yüzey alanı [m^2]
C	: emniyet katsayısı
C	: eşdeğer ısı kapasitesi [J/m^3K]
c	: özgül ısı [$J/kg K$]
c'	: ortalama özgül ısı [$J/kg K$]
D	: çap [m]
E	: enerji [J]
e	: et kalınlığı [m]
H	: volumetrik entalpi [J/m^3]
h	: entalpi [J/kg]
h	: ısı taşınım katsayısı [W/m^2K]
h'	: tel ile çevreleyen polietilen teması sebebiyle ısı geçiş katsayısı [W/m^2K]
I	: akım [amper]
K	: toplam ısı geçiş katsayısı [W/m^2K]
k	: ısı iletim katsayısı [W/mK]
L	: faz değişim ısısı [J/kg]
L_w	: tel boyu [m]
M	: polietilenin molekül ağırlığı [$kg/kmol$]
P	: güç [W]
p	: basınç [Pa]
q	: ısı akısı [W/m^2]
$\dot{q}$	: ısı üretimi [W/m^3]
R	: direnç [ohm]
T	: sıcaklık [$^0C, ^0K$]
t	: zaman [s]
U	: gerilim [volt]
w_e	: teldeki ısı üretimi [W]
x,y,z	: kartezyen koordinatlar
α	: ısı yayılım katsayısı [m^2/s]
α_w	: direnç sıcaklık katsayısı [$1/^0K$]
χ	: ortalama difüzyon derinlik mesafesi [mm]
λ	: öz iletkenlik [$m/mm^2\Omega$]
γ	: öz direnç [$\Omega mm^2/m$]
ρ	: yoğunluk [kg/m^3]

indisler :

l	: sıvı
s	: katı
0	: başlangıç hali, referans hal
x	: x yönünde
n	: yüzeye normal doğrultuda
w	: ısıtıcı tel

POLİETİLEN DOĞALGAZ BORULARININ ELEKTROFÜZYON YÖNTEMİ İLE BİRLEŞTİRİLMESİNİN ISIL ANALİZİNİN TEORİK ve DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ

ÖZET

Yapılan bu çalışmada, polietilen doğalgaz borularının elektrofüzyon yöntemiyle birleştirilmesinin ısı analizi, teorik ve deneysel olarak incelendi. Çeşitli avantajları sebebiyle son yıllarda polietilen boruların birleştirilmesinde tercih edilen elektrofüzyon yöntemi, boru dış yüzeyi ile onun üzerine geçirilen manşon iç yüzeyi arasına spiral olarak sarılarak yerleştirilen iletken tellere elektrik enerjisi verilerek telin ısınması ve çevresindeki polietilenin erimesi, belli bir süre sonra enerjinin kesilmesiyle birlikte soğuyarak katılaşması ve boru ile manşonun yekpare hale gelmesi esasına dayanır.

Elektrofüzyon kaynak yönteminde, polietilenin erimesi ve katılaşması sebebiyle faz değişimi önemli bir yer tutar. Polietilenin faz değişimi tek bir sıcaklık değerinde olmayıp bir geçiş bölgesi olan sıcaklık aralığında gerçekleşmektedir. Bu durum göz önünde bulundurularak faz değişim ısısı, yaygın bir şekilde kullanılan iki yaklaşımla dikkate alındı. Bunlar eşdeğer özgül ısı metodu ve entalpi metodu olarak adlandırılmaktadır. Eşdeğer özgül ısı metodunda, faz değişimini dikkate alan özgül ısı değişimi göz önüne alınarak zamana bağlı ısı iletimi problemi olarak çözülür. Faz değişimi sıcaklık aralığında, yoğunluk ve faz değişimi hesaba katılarak eşdeğer ısı kapasitesi tanımlanır. Bu durumda ısı transferi denklemi,

$$C \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(k \nabla T) \quad (1)$$

şeklinde ifade edilir. Burada $C = \rho c$ birim hacim için eşdeğer ısı kapasitesi olarak tanımlandı.

Faz değişim problemlerinin çözümünde yaygın bir şekilde kullanılan diğer bir yöntem olan entalpi metodunda, özellikle faz değişim bölgesinde özgül ısı değişimi yerine faz değişim ısısının ve faz değişim sıcaklık aralığının bilinmesi yeterli olmaktadır. Bu durumda (1) denklemi,

$$\frac{\partial H}{\partial t} = \nabla(k \nabla T) \quad (2)$$

şekline dönüştür. Burada $H = H(T) = \rho c T$ birim hacim için entalpi olarak tanımlanır.

Yapılan bu çalışmada, iyi bir elektrofüzyon kaynağı için en önemli parametre olan ısıtma ve soğuma periyotlarında sıcaklığın zaman ve konumun fonksiyonu olarak bulunması için bir model oluşturularak enerji denklemi kartezyen koordinatlarda iki boyutlu olarak polietilenin ısı iletim katsayısı, yoğunluk ve özgül ısı değerlerinin sıcaklıkla değişimi dikkate alınarak oluşturuldu. Kurulan modelde ısıtıcı teller için ısı üretimi tel direncinin sıcaklıkla değişimi göz önünde bulundurularak tel

sıcaklığına bağılı olarak ifade edildi. Ayrıca sistem içerisinde yer alan ısıtıcı teller arasında muhtemel sıcaklık farkı sebebi ile bunlar arasındaki ısı iletimi incelendi.

Oluşturulan model için tüm değişkenleri parametre olarak dikkate alan modüler bir bilgisayar programı hazırlanarak faz değişimini içeren her iki yaklaşım sonlu farklar yöntemiyle ve ayrıca ANSYS paket programı kullanılarak çözüldü.

Elektrofüzyon kaynağının iyice anlaşılması ve sayısal çözüm sonuçlarının karşılaştırılması için deney tesisatı oluşturularak deneysel çalışma ve ölçümler yapıldı. Deneysel ölçümlerle sayısal sonuçlar karşılaştırıldığında birbirleri ile uyumlu oldukları görüldü.



THERMAL ANALYSIS OF ELECTROFUSION JOINING IN POLYETHYLENE GAS PIPES

SUMMARY

In this study, thermal analysis of electrofusion joining process for polyethylene natural gas pipelines has been done. The joining technique involving electrofusion of polyethylene piping seems to be in increasing widespread use throughout the world. This development is due a part to the ease with which it is applied and the high degree of reliability of joints achieved. The major parameter for effective electrofusion jointing is the heating energy generated by electrical resistance coil embedded in the fitting. Fusion welded joints are made by bringing two molten polyethylene surfaces together so that they cool and recrystallise a welded joint forms at their interface.

The heat transfer phenomenon with the phase change also occurs in the electrofusion process by means of melting and solidification. Polyethylene does not have only one temperature value for phase change but there is an interval of phase change as transition zone. There are basically two approaches to handling the latent heat, the equivalent specific heat method and the enthalpy method. In equivalent heat capacity method, a phase change problem can be solved like any nonlinear heat conduction problem, provided that latent heat effects are included in the specific heat of the material. In the temperature interval of phase change, an equivalent heat capacity can be defined to take into account both the density and the latent heat. The governing equation can be written as

$$C \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(k \nabla T) \quad (1)$$

where $C = \rho c$ is the equivalent heat capacity per unit volume.

Another widely used technique implies the use of enthalpy as a natural and integral part of the solution methodology. The method is based on a mixed temperature enthalpy formulation which, in combination with an explicit time stepping scheme. In enthalpy method, the governing equation becomes

$$\frac{\partial H}{\partial t} = \nabla(k \nabla T) \quad (2)$$

where $H = H(T) = \rho \cdot c \cdot T$ volumetric enthalpy per unit volume.

In this study, a transient heat transfer analysis was modeled to obtain temperature history as a function of time and position. The model includes two dimensional cartesian coordinates and temperature dependent thermal properties. The power input which generates heat is stated temperature dependent since the wire material

resistivity changes as a linear function of temperature. Mostly the spiral heating element is modeled as independent rings without a direct thermal link between them. It was presumed that any two adjacent rings were linked by a straight wire made of the same material and with same cross section as that of the rings. Subsequently, the wire-wire interface conductance value was calculated.

Two computer programs based on explicit finite difference scheme were written for each approaches handling the latent heat for phase change taking into account temperature dependent material properties. In addition, the problem was solved using ANSYS package program.

Experimental work has been carried out to achieve a detailed understanding of the electrofusion welding process and to compare the numerical results with experimental data. Agreement between predicted results and experimental data is good and satisfactory.



1. GİRİŞ

Son yıllarda dünyada, su ve atık su şebekeleri ile doğalgaz dağıtım hatlarında kullanılması sebebiyle plastik boruların önemi hızlı bir şekilde artmaktadır. Bu artışın oluşmasında plastikler ve boru malzemelerindeki gelişmeler ve bunun sonucunda plastik boruların güvenle kullanılması önemli katkıda bulunmuştur. Avrupa’da plastik boru üretimi 1985 yılında 1,4 milyon ton iken bu rakam 1998 yılında 2,9 milyon tona çıkmıştır. Amerika’da ise 1986 yılında 1,8 milyon ton olan plastik boru üretimi 1998 yılında 2,7 milyon tona ulaşmıştır.[1]

Plastikler büyük bir çoğunlukla ham petrol esaslı petrokimyasallardan üretilmektedir. Günümüzde ham petrolün %96’sı ısıtma ve ulaşımda yakıt olarak kullanılmasına karşılık % 4’ü plastik üretiminde kullanılmaktadır. Plastiklerin hammaddesi olan petrol kaynakları sınırlı olduğundan kullanılmış plastik malzemelerin geri kazanılması çevre açısından önemlidir. Termoplastikler (PE, PP, PB,PVC) yeniden kullanılabilir malzemelerdir.[2]

Günümüzde termoplastik borular, özellikle polietilen borular diğer konvansiyonel çelik ve dökme demir borulara göre avantajlara sahiptirler. Bunların başında korozyona uğramaması ve esneklik ve hafiflik dolayısıyla kolay dönebilir olmasıdır. Aynı zamanda kolayca birleştirilebilir olması, kolay bakım ve tamiri, içindeki akışkan için düşük sürtünme direnci, büyük deformasyonlara rağmen parçalanmaması, asit ve kimyasallara direnci diğer avantajları olarak sayılabilir. Polietilen borular metrelerce bir ek yapmaya ihtiyaç duyulmadan dönebilir.

Plastik boruların kullanımının artması, bu boruların birleştirilmesinin de önemini arttırmıştır. Plastiklerin birleştirilmesi için Bölüm 3’te anlatıldığı gibi bir çok yöntem mevcuttur. Fakat boruların arazi şartlarında birleştirilmesi için bu metodların bir çoğu pratikte kullanılmamaktadır. Sıcak levha kaynağı ve elektrofüzyon yöntemi

polietilen boruların birleştirilmesi için pratikte uygulanabilen yöntemlerdir. Özellikle gaz dağıtımında kullanılan birleştirme yönteminin emniyeti öne çıkmaktadır.

Polietilen boruların sıcak levha kaynağı tekniğinde, birleştirilecek her iki borunun uçları sıcak levha ile ısıtılır, daha sonra bu levha aradan çekilerek ısıtılan uçlar birbirleri ile basınç altında birleştirilerek bir süre beklenir. Bu yöntem özellikle et kalınlığı fazla büyük çaplı borularda kullanılır. Ancak polietilen boruların sıcak levha kaynağı ile birleştirilmesi yönteminin bazı dezavantajları vardır. Özellikle dar kazı alanlarında sıcak levha kaynak makinasının kazı içerisinde bulunma gerekliliğinden dolayı kaynak olacak yerde geniş bir alan kazılması gerekmektedir. Ayrıca birleştirilecek boruların alın altına gelmesi için aynı doğrultuya getirilmeleri gerekmektedir. Özellikle büyük çaplı borular için kullanılan ekipmanın ağır olması ve kaynak bölgesinin basınç altında tutulması için büyük kuvvetlere ihtiyaç olması diğer dezavantajları olarak sayılabilir.[3]

Bu çalışmanın konusu olan elektrofüzyon yöntemi ise polietilen boruların birleştirilmesinde tercih edilmektedir. Hareket imkanının kısıtlı olduğu dar kazılarda hem montaj hem de tamir maksatlı olarak kullanımı kolaydır. Bu sebeple boru hatlarının döşenmesinde daha küçük kazı genişliğine ihtiyaç vardır. Kullanılan güç kaynağı ve ek parçaları pahalı değildir. Güç kaynağı kolayca taşınabilir hacim ve ağırlığa (yaklaşık 25 kg) sahiptir.

Elektrofüzyon kaynak yönteminin yaygın olarak kullanılmaya başlanılmasına rağmen ampirik hesaplamalar ve deneme yanılma yöntemi ile son şekil verilmektedir. [4] Konuyla ilgili literatür araştırması yapıldığında sınırlı sayıda çalışmanın yapılmış olduğu görülmektedir. Yapılan çalışmalarda kurulan modeller elektrofüzyon prosesini tam olarak tanımlamamakta, bir kısım basitleştirme ve kabuller yapılmaktadır.

Elektrofüzyon kaynağının modellenmesi ile ilgili olarak ilk çalışma 1985 yılında Pitman [5] tarafından yayınlandı. Pitman elektrofüzyon kaynağı modellenmesinde bir boyutlu levha şeklinde boru ve manşon malzemesini tanımladı. Boru manşon ara yüzüne ısıtıcı tel yerine uniform levha ile ısı üretimini kullandı. Saint –Royre, Gueugnaut ve Revert [6] yaptıkları deneylerden ampirik olarak ısıtma hızına bağlı

olarak iyi bir elektrofüzyon kaynağı için gerekli minimum ara yüzey sıcaklığını tanımladılar. Nussbaum, Meister ve Dufour [7] montaj boşluğunu ihmal ederek yüzeylerde tam temas kabulü ile erime öncesi katı bölge, erime geçiş bölgesi ve erimiş bölge için bir boyutlu olarak kartezyen koordinatlarda ısı transferi denklemini oluşturdular. Nussbaum, Duofo ve Gueugnaut [8], polietilen boru manşon değişik malzeme çiftleri için makromolekül difüzyonu dikkate alarak yüzey difüzyon katsayısı kavramını tanımlayarak ısıtma hızına bağlı olarak iyi bir kaynak için minimum ara yüzey sıcaklığı değerlerini verdiler. Bu modelde de ısıtıcı tel yerine katman kullanıldı. Nakashiba, Nihimura ve Inoue [9] ısıtıcı tellerin ısı üretimini teller bağımsız ve uniform olarak alarak ısı transferi denklemini sıcaklığın zamanla değişimi olarak iki boyutlu silindirik koordinatlarda ifade ettiler. O'Donoghue, Green ve Kannien [10], ısıtıcı tel yerine katman alarak iki boyutlu olarak ABAQUS paket programı aracılığı ile çözdüler. Rosala, Day ve Wood [11] yaptıkları çalışmada iki boyutlu çalışmada manşon boru ara boşluğunun eriyen polietilen malzemenin akışı ile kapanmasını ve böylece ara boşluğun ısı iletim katsayısının değişimini öne çıkardılar.

Yapılan bu çalışmada iyi bir elektrofüzyon kaynağı için en önemli parametre olan ısıtma ve soğuma periyotlarında sıcaklığın zaman ve konumun fonksiyonu olarak bulunması için bir model oluşturularak enerji denklemi kartezyen koordinatlarda iki boyutlu olarak oluşturuldu. Kurulan modelde ısıtıcı teller için ısı üretimi tel direncinin sıcaklıkla değişmesini dikkate alarak tel sıcaklığına bağlı olarak ifade edildi.

Ayrıca sistem içerisinde yer alan ısıtıcı teller arasında muhtemel sıcaklık farkı sebebi ile bunlar arasındaki ısı iletimi incelendi.

Polietilenin erimesinde faz değişimi tek bir sıcaklıkta olmayıp bir geçiş bölgesi olan sıcaklık aralığında gerçekleşmektedir. Bölüm 5'te bu durum göz önünde bulundurularak faz değişim ısısı iki yaklaşımla dikkate alındı. Bunlar eşdeğer özgül ısı metodu ve entalpi metodudur.[12,13,14,15] Eşdeğer özgül ısı metodunda, faz değişimi etkisini dikkate alan özgül ısı değişimi göz önüne alınarak zamana bağlı ısı iletimi problemi olarak çözülür. Faz değişimi sıcaklık aralığında, yoğunluk ve faz

değişimi hesaba katılarak eşdeğer ısı kapasitesi tanımlanır. Bu durumda ısı transferi denklemi aşağıdaki şekilde yazılır.

$$C \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(k \nabla T) \quad (1.1)$$

Burada T [K] sıcaklık, t [s] zaman, k [W/mK] ısı iletim katsayısı, C=ρc [J/m³K] birim hacim için eşdeğer ısı kapasitesi, ρ [kg/ m³] yoğunluk ve c [J/kg K] özgül ısı'dır. Burada c'nin özellikle faz değişim bölgesindeki değişimi oldukça iyi bir şekilde belirlenmelidir.

Faz değişim problemlerinin çözümünde yaygın bir şekilde kullanılan diğer bir yöntem entalpi metodudur.[14] Entalpi metodunda özellikle faz değişim bölgesindeki özgül ısı c'nin değişimi yerine faz değişim ısısının ve faz değişim sıcaklık aralığının bilinmesi yeterli olmaktadır. Çoğu zaman c'nin faz değişimi bölgesindeki değişimi hassas olarak bilinmemesine rağmen faz değişim ısısı bilinmektedir. Entalpi metodunda explicit zaman adımına sahip sıcaklık entalpi ifadelerine sahip formülizasyonu ile nümerik çözüme oldukça uygundur. Isı transferi denklemi aşağıdaki şekilde ifade edilebilir.[14,15,26,17]

$$\frac{\partial H}{\partial t} = \nabla(k \nabla T) \quad (1.2)$$

Burada H=H(T)=ρcT [J/m³] birim hacim için entalpi, T sıcaklık, k ısı iletim katsayısı, ρ yoğunluk ve c özgül ısı'dır. Genel ısı transferi denklemi sıcaklıkla değişen yoğunluk ve özgül ısıyı içeren entalpi değişimi formuna dönüştürüldü. Böylece erime öncesi katı hal, erime bölgesi ve erimiş bölge için tek bir denklem geçerli hale geldi.

Oluşturulan model için, tüm değişkenleri parametre olarak dikkate alan modüler bir program hazırlanarak faz değişimini içeren her iki yaklaşım sonlu farklar yöntemiyle ve ayrıca ANSYS paket programı kullanılarak çözüldü.

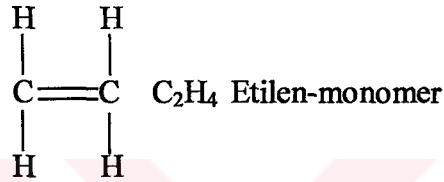
Ayrıca elektrofüzyon kaynağının iyice anlaşılması ve yapılan deneysel ölçümlerle nümerik sonuçların uyumunun karşılaştırılması için deney tesisatı oluşturularak 63 mm ve 110 mm çapındaki polietilen boru manşon elektrofüzyon kaynağı için deneysel çalışma ve ölçümler yapıldı. Deneysel ölçümlerle nümerik sonuçlar karşılaştırıldığında birbirleri ile uyumlu oldukları görüldü.



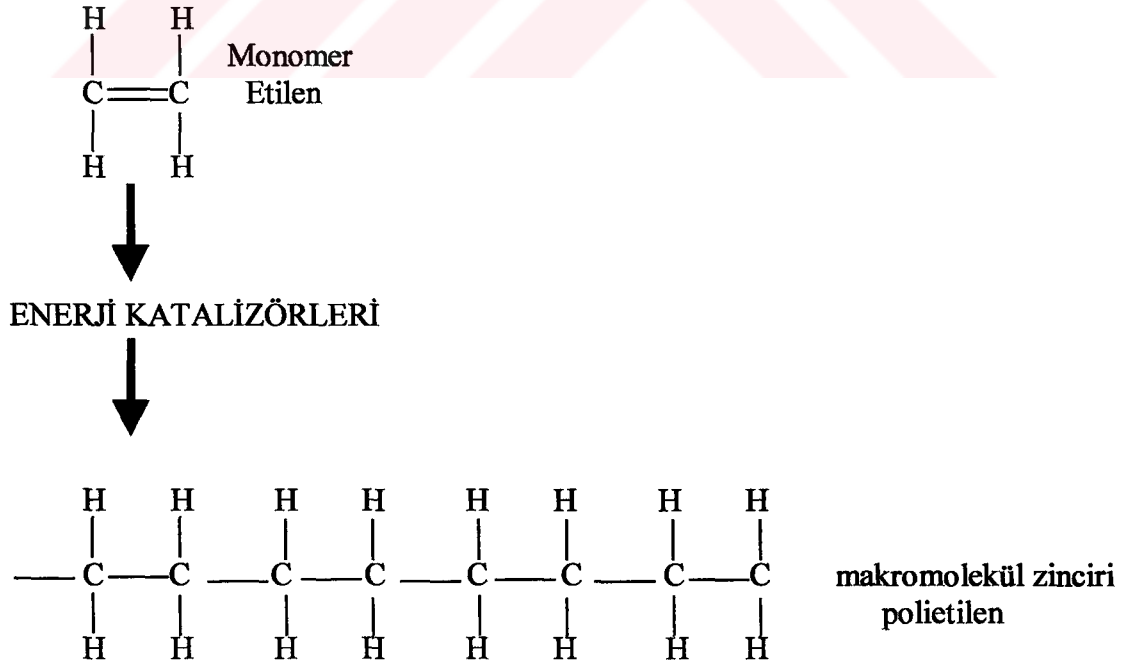
2. PLASTİKLER ve POLİETİLEN

2.1 Plastiklerin Yapısı ve Sınıflandırılması :

Plastikler, doğal ürünleri kimyasal dönüşümünden ve organik bileşiklerden sentetik olarak elde edilen malzemelerdir. Ana bileşenleri karbon (C) ve hidrojen (H) dir. Plastiklerin bir çoğunun temel yapısı monomer olarak adlandırılan karbon hidrojen bileşimleridir. [18]

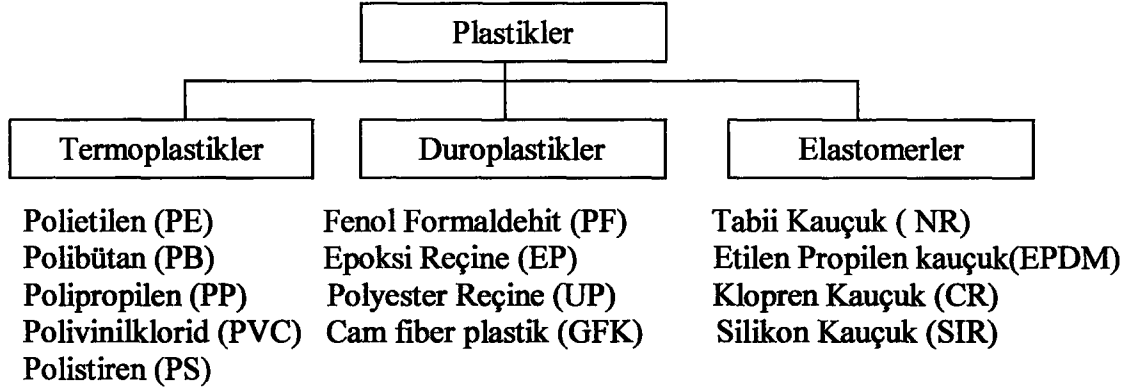


Plastiklerin hammadde olarak elde edildiği doğal bileşikleri, selüloz, kömür, petrol ve doğalgazdır. Polimerizasyon, plastik sentezleri oluşturmada en sık kullanılan yöntemdir. Polimerizasyonda monomerler uç uca getirilerek makromolekül zinciri oluştururlar.



Plastikler temel olarak üç ana gruba ayrılırlar. Bunlar termoplastikler, duroplastikler ve elastomerlerdir. Şekil 2.1' de sınıflandırma görülmektedir.

Plastikler üretim sırasında kullanılan katkı maddelerinin etkisiyle değişik makromoleküler yapıya sahip olurlar. Bu katkılara bağlı olarak molekül zincirleri dallanmış yapı veya uç uca bağlı düzgün zincir yapı oluştururlar. Termoplastik uç uca bağlı molekül zinciri yapısına sahiptir .



Şekil 2.1. Plastiklerin sınıflandırılması



Şekil 2.2 Plastiklerde makromolekül zincir yapısı

Değişik moleküler yapıya sahip olan bu plastik grupları aynı zamanda değişik özellikler gösterirler. Bu özellikler her bir sınıf için aşağıda özetlenmiştir.[2]

1) Termoplastikler :

- Tekrar eritilebilir,
- Füzyonla birleştirilebilir,
- Kristalleşme oranı yoğunluk ve mekanik özellikleri belirler,
- Kuvvetli mekanik gerilme altında sürünmeye eğilimlidir,
- Artan sıcaklıkla mukavemeti azalır,
- Defalarca dönüştürülebilir ve şekil verilebilir.

2) Duroplastikler :

- Eritilemezler,
- Füzyonla birleştirilemezler,
- Bağ sayısı mekanik özellikleri belirler,
- Mekanik gerilme sonucu şekil değiştirir fakat gerilme sonrası eski haline gelir.

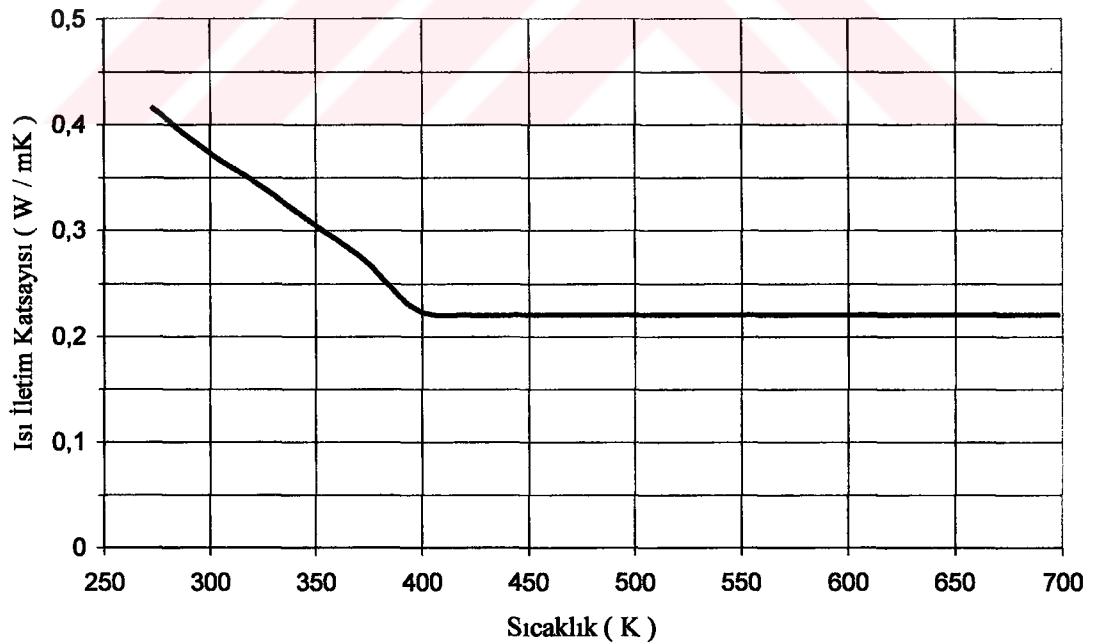
- e) Sadece yüksek sıcaklıkta dar bir alanda elastik davranış gösterir bu sebeple iyi bir ısıl kararlılığa sahiptir.
- f) Sadece bir kez şekil verilebilir.

3) Elastomerler :

- a) Eritilemezler,
- b) Füzyonla birleştirilemezler,
- c) Bağ sayısı kauçuk sertliği için belirleyicidir,
- d) Mekanik gerilme altında kolayca şekil değiştirebilir,
- e) Düşük sıcaklıklarda elastikliğini muhafaza edebilir.

2.2 Polietilenin Isıl Özellikleri :

Polietilen oldukça düşük ısıl iletkenliğe (bakırın yaklaşık binde biri kadar, yaklaşık 0,42 W/mK) ve oldukça yüksek özgül ısıya (bakırın yaklaşık yedi katı kadar, yaklaşık 2,7 kJ/kgK) sahiptir. Düşük ısıl iletkenlik moleküllerin rast gele dizilimi, yüksek özgül ısı değeri ise artan sıcaklıkla beraber yapı içerisinde moleküllerin titreşim serbestliğinin olması sebebiyledir.[19] Şekil 2.3'te sıcaklıkla ısıl iletkenliğin değişimi gösterilmiştir.

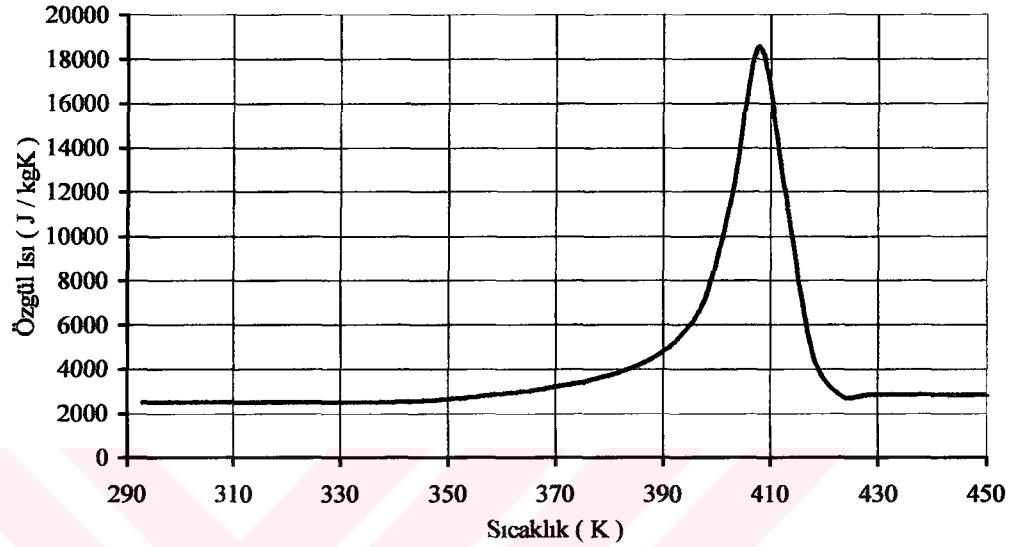


Şekil 2.3. Polietilenin sıcaklıkla ısıl iletim katsayısının değişimi.

Polietilen özgül ısı değeri, moleküllerin titreşim durumuna bağlıdır. Bu sebeple, bu titreşim hareketini önleyecek her türlü etki, özgül ısı değerini düşürecektir. Bu

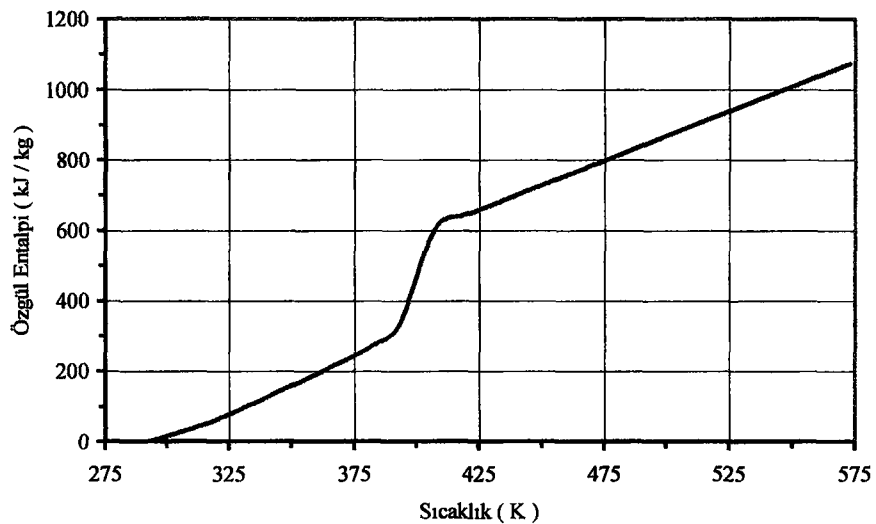
durumda katı haldeki polietilen için yüksek kristalleşme ve yoğunluk, düşük özgül ısı anlamına gelmektedir.

Yarı kristalleşmiş yapıya sahip olan polietilen, belirli bir sıcaklık aralığında erir. Özgül ısının sıcaklıkla değişimi şekil 2.4'te gösterilmiştir.



Şekil 2.4. Polietilenin özgül ısı değerinin sıcaklıkla değişimi

Polietilen özgül ısı değerinin özellikle erime bölgesinde hızlı değişimi sebebiyle, pratikte özgül entalpi tanımı yapılır ve 20 °C'deki değeri sıfır değerine eşitlenir. Polietilen erimesi için gerekli ısı miktarı böyle hazırlanmış grafik üzerinde kolayca okunabilir. [20] Şekil 2.5'te özgül entalpinin sıcaklıkla değişim grafiği verilmiştir.



Şekil 2.5. Polietilen özgül entalpisinin sıcaklıkla değişimi

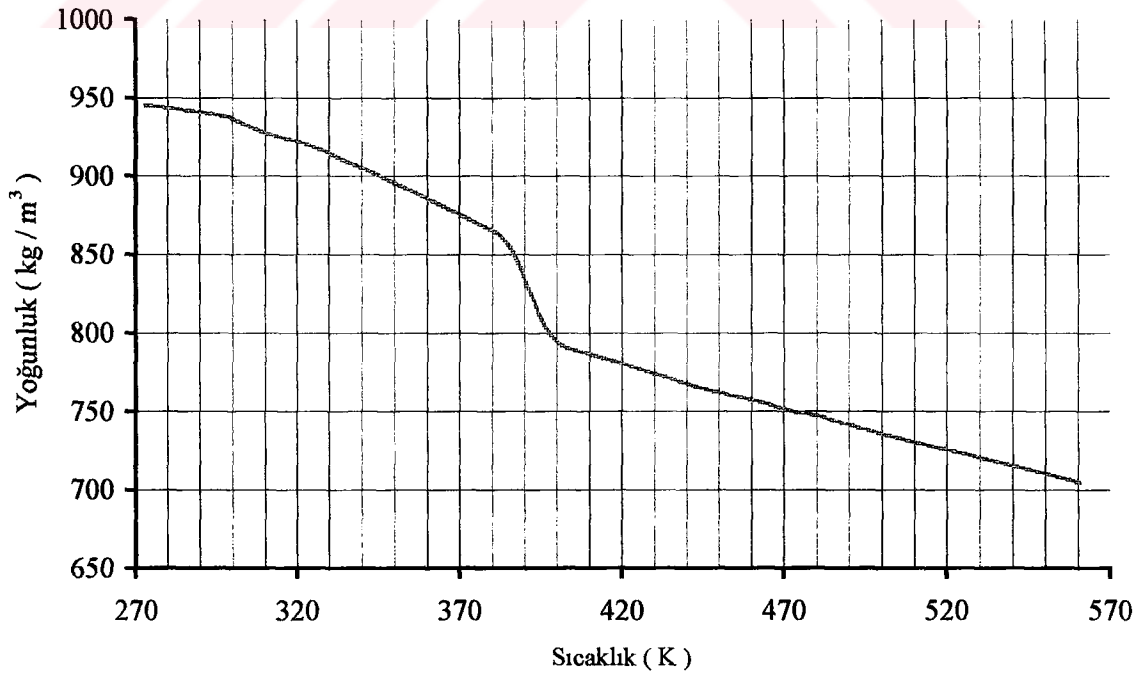
Füzyon anındaki faz değişim ısısı özgül ısı değişiminin sıçrama yaptığı şekil 2.4'te görülen erime sıcaklık aralığına isabet eden bölgede altta kalan alandır. Erime için gerekli entalpi değişimi çeşitli polietilenler için Tablo 2.1 de verilmiştir.

Tablo 2.1. Çeşitli polietilenler için erime sıcaklık aralığı ve faz değişim ısısı [11]

Polietilen Tipi	Yoğunluk (kg/m ³)	Erime Aralığı (°C)	Faz değişim ısısı (J/kg)
FINATHENE 3802 Y	939.0	115.9-126.3	137721
RIGIDEX PC 02-40 R919	938.3	116.9-128.2	148186
SOLVAY ELTEX TUB 125	950.8	121.2-130.0	182512
SOLVAY ELTEX TUB 125 YCF	952.7	123.0-129.9	175814

Soğuma durumunda, yukarıda ifade edilen aynı ısı miktarları ekzotermik olarak bırakılacaktır.

Polietilenin sıcaklıkla değişen diğer önemli bir karakteristiği de yoğunluktur. Şekil 2.6'da görüldüğü gibi erime sıcaklığı bölgesinde bir sıçrama vardır. Bu grafikte ayrıca özgül genleşme durumu da görülebilmektedir. Eğriden görüldüğü gibi katı durumdaki genleşme ile sıvı durumdaki genleşme oranları aynı mertebededir. Fakat katı fazdan-sıvı faza geçiş bölgesinde büyük bir artış vardır.

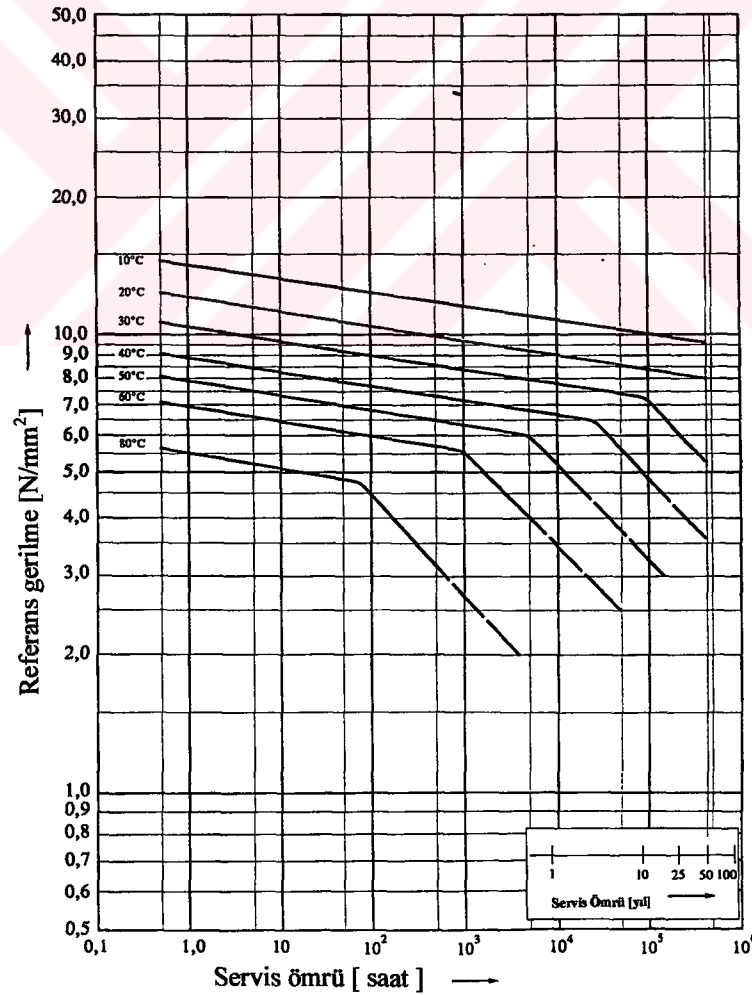


Şekil 2.6. Polietilen yoğunluğunun sıcaklıkla değişimi

2.3 Polietilen Borular :

Doğalgaz dağıtım hatlarında yaygın olarak PE 80 ve son yıllarda PE 100 sınıfı polietilen malzemeden üretilen borular ve ek bağlantı parçaları kullanılmaktadır. Bu boruların yoğunlukları $0,930 - 0,965 \text{ kg/m}^3$ arasında değişmektedir.[28] PE 80 polietilen için minimum 8 MPa, PE 100 polietilen için minimum 10 Mpa gerilme mukavemetine sahip olmalıdır. Doğalgaz hatlarında kullanılan polietilen yoğunluk bakımından orta yoğunluklu (MDPE) ve yüksek yoğunluklu (HDPE) sınıflarına ayrılmaktadır.

Polietilen boruların dizaynında minimum gerilme mukavemeti (MRS) standartlar gereği [21,22] 20°C işletme basıncında en az 50 yıllık servis ömrünü sağlayacak şekilde olmalıdır. Bu durum şekil 2.7’de gösterilmiştir.



Şekil 2.7 PE 80 sınıfı Polietilen boru için çeşitli çalışma şartlarında servis ömrü

Boru hatları dizaynında, minimum gerilme mukavemetine (MRS) bağlı olarak çevresel gerilme ($\sigma_{\max}$), emniyet katsayısı C göz önüne alınarak hesaplanır. [23,27]

$$\sigma_{\max} = \frac{MRS}{C} \quad (2.1)$$

Gaz taşıyan hatlarda emniyet katsayısı C minimum 2 olarak alınır. Bu durumda müsaade edilebilir işletme basıncı aşağıdaki şekilde hesaplanır.

$$PMS = \frac{20 \times MRS}{C \times (SDR - 1)} \quad (2.2)$$

Burada,

PMS : müsaade edilebilir maksimum işletme basıncı (bar),

MRS : minimum gerekli mukavemet (MPa),

C : emniyet katsayısı,

SDR : standart boyut oranı 'dır.

Standart boyut oranı standartlar tarafından polietilen borular için nominal boru dış çapının, nominal boru et kalınlığına oranı olarak tanımlanmıştır.

$$SDR = \frac{D}{e} \quad (2.3)$$

D : polietilen boru nominal dış çapı

e : polietilen boru nominal et kalınlığı

Avrupa'da ve ülkemizde kullanılan 4 bar basınçlı dağıtım şebekelerinde SDR 11 borular, yani boru dış çapı ile et kalınlığı oranı 11 olan borular kullanılmaktadır. Verilen bir P basıncı için et kalınlığı hesaplanmak istenilirse (2.1) den elde edilen gerilme (2.4) denkleminde yerine konularak hesaplanır.

$$\sigma_{\max} = \frac{P(D - e)}{2e} \quad (2.4)$$

63 mm. Nominal dış çapındaki bir doğalgaz borusu orta basınçlı dağıtım hattında SDR 11 sınıfında kullanılır. Bu durumda boru et kalınlığı (2.3) eşitliğinden

$$e = \frac{D}{SDR} = \frac{63}{11} = 5,73 \text{ mm bulunur.}$$

Emniyet katsayısı $C=2$ alındığında, 63 mm çapındaki PE80 malzemeden yapılmış polietilen boru için müsaade edilebilir işletme basıncı (2.2) eşitliğinden

$$PMS = \frac{20 \times MRS}{C \times (SDR - 1)} = \frac{20 \times 8}{2 \times (11 - 1)} = 8 \text{ bar olarak hesaplanır.}$$



3. PLASTİKLERİN BİRLEŞTİRİLME METODLARI :

3.1. Genel Sınıflandırma :

Termoplastik ve termoplastik kompozit bağlantıları için füzyon prosesi, polimerin eriyik hale kadar ısıtılması ve fiziksel olarak polimer zincirlerin iç yayılması ile bağ oluşturmalarını içermektedir. Bu proseslerin tercih edilmesini sağlayan hız, güçlü bağlantılar, kirli yüzey toleransı, bağlantıda yekparelik ve geri dönüşüm birçok özellikleri mevcuttur. Bu füzyon kaynak prosesleri iki ana gruba ayrılabilir.[24,25]

- 1) Dış ısıtmayı içeren prosesler (sıcak gaz, sıcak levha, direnç ve yüksek frekans ısıtma)
- 2) Mekanik hareketleri içeren prosesler (ultrasonik, sürtünme ve titreşim kaynak prosesleri)

Bu yöntemler kısaca temel prensipleri göz önünde tutularak açıklanacaktır.

3.2 Sıcak Gaz Kaynağı :

Sıcak gaz veya sıcak hava kaynağında , ısıtılan gaz veya hava akımı, yüzeyleri eritmek için bağlantı bölgesine ve dolgu çubuğuna gönderilir. Dolgu çubuğu daha sonra yavaşça bağlantı bölgesine sürülür, erimiş polimerle bağlantı kurmasına sebep olur. İyi sonuçlar için dolgu malzemesi, kaynak edilecek malzemelerle aynı kompozisyona sahip olmalıdır. Bu yöntemde genel olarak sadece yüzeyler eritilir. Ara boşluklar daha fazla yüzeye sahip olması için genellikle V şeklinde açılır. Dolgu çubukları, birleştirilecek malzemelere daha iyi temas sağlaması ve birden fazla paso yapıldığında daha iyi sızdırmazlığı sağlaması için genellikle üçgen şeklindedir. Gaz sıcaklığı polimere bağlı olarak değişmektedir fakat genellikle 200-300°C aralığındadır ve gaz akış oranı dakikada 15-60 litre arasında değişebilmektedir.

Kullanılan gaz, nitrojen, hava, karbondioksit, hidrojen ve oksijen içerir. Oksidan olmayan gazlar polietilen gibi oksitlenmeye hassas malzemeler için kullanılır.

Basınçlı hava çok amaçlı kullanım ve ekonomiklik bakımından en çok tercih edilen gazdır.

PVC, polietilen, polipropilen, polimetil metilakrilat, polikarbon ve naylon sıcak gaz kaynağı kullanılarak kaynak edilen ve yaygın kullanılan plastiklerdir. Poliolefin tankların sürekli kaynağı ve termoplastik maddelerin ve konteynerlerin tamirinde sık olarak kullanılmaktadır. Bu kaynak tekniği sürekli proseslere ve otomatik teçhizatlı mekanizmalarda uygulanabilir.

3.3 Sıcak Levha Kaynağı :

Sıcak levha kaynağı özellikle büyük çaplı polietilen boruların birleştirilmesinde alın kaynağı (butt fusion) olarak da bilinir. Güvenilir ve kolay uygulanmasından dolayı plastik akü kutuları, yakıt tankları ve yakıt doldurma boruları bu prosesle kaynak edilir. Sıcak levha kaynağının bir başka uygulaması da, gaz ve su dağıtımında, atık su ve kimyasal tesislerde korozyif maddelerin taşınmasında kullanılan termoplastik boruların bağlantılarının kaynağıdır.

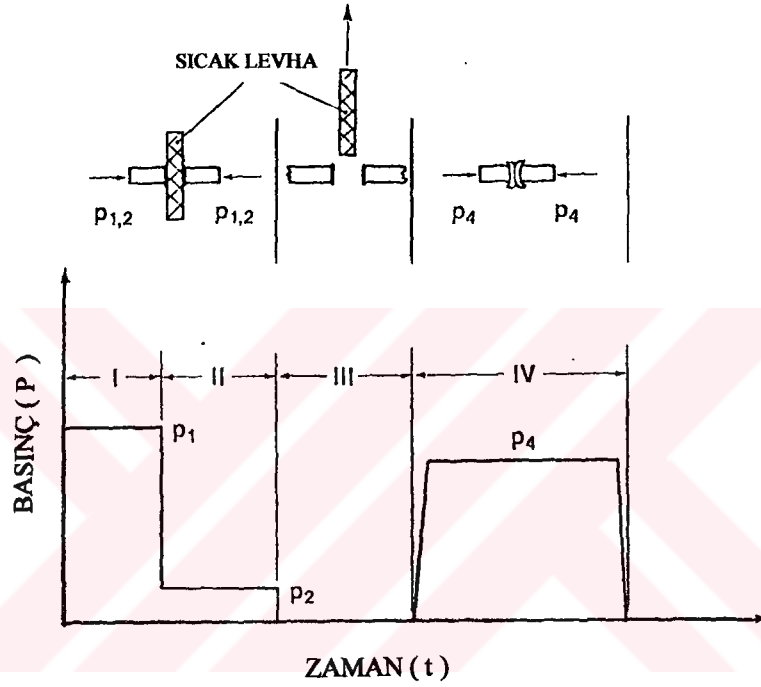
Sıcak levha kaynağındaki kullanılan yöntemin açıklaması basınç-zaman grafiğinde dört aşamada şematik olarak gösterilmiştir.(Şekil 3.1) Birinci aşamada, parça yüzeyi sıcak levha yüzeyi ile birleştirilir. Birleştirilecek yüzeylerin sıcak levhaya tam temasını sağlamak için nispeten yüksek basınç uygulanır. Bu basınç, erimiş plastik yanlara doğru akmaya başlayana kadar sürdürülür. İkinci aşamada iç yüzeydeki basınç azaltılır. Böylece erimiş film tabakasının oluşmasına izin verilir. Film kalınlığı film tabakasından geçen ısıнын kontrolü ile sağlanır. Üçüncü aşamada, erimiş film yeterli kalınlığa ulaştığı zaman sıcak levha ve birleştirilecek parçalar birbirlerinden ayrılır. Dördüncü aşamada erimiş ara yüzeyler bir araya getirilir ve parçalar katılaşana kadar bekletilir. Dördüncü aşama sırasında soğuma olurken eriyen film yanlara doğru akar. Erimiş film yüzeylerinin soğumasını önlemek için üçüncü aşama mümkün olduğunca kısa tutulmalıdır. Bu yöntemin önemli parametreleri şunlardır;

- a) Sıcak levhanın sıcaklığı,
- b) Birinci aşamadaki basınç ve süre,
- c) İkinci aşamanın erime basıncı ve süre,
- d) Üçüncü aşamada sıcak levhanın ayrılıp boruların birleştirilmesine geçilen süre,

e) Dördüncü aşamada kaynak basıncı ve süresi.

Tüm bu parametrelerin doğru seçilmesi önemlidir. Mesela levha sıcaklığı doğru seçilmez ise kaynak edilecek malzeme yüzeylerinin özellikleri bozulabilir. Dördüncü aşamada, film kalınlığı ve sıcaklığı ile basıncın kontrol altında olduğu soğuma süresi yarı kristal polimerlerde kristalleşme oranını belirler.

Prensip olarak, ısıyla eriyebilen herhangi bir polimer sıcak levha kaynağı yöntemiyle birleştirilebilir.



Şekil 3.1 Sıcak levha kaynağında basınç ve zaman süreçleri

Kaynak süresi, eritilecek polimerin hacmi ve parçaların ısı iletkenliği ile değişir. Bir buçuk metre çap ve yaklaşık 10 cm et kalınlığındaki borular için saatler gerekebilir. Sıcak plaka kaynağı edilecek parçaların boyutu, sıcak levhanın pratikte olabilecek boyutu, ve bahsedilen aşamalardaki hareket ve basınç değerleri sebebiyle sınırlıdır.

3.4 Dielektrik Kaynağı :

Bu proseste 13-120MHz arasındaki yüksek frekanslı elektromanyetik alan dielektrik ısıtma ile plastiklerin doğrudan olarak ısıtılmasında kullanılır. Bu teknik yüksek dielektrik kayıp faktörüne sahip ABS ve PVC gibi malzemelerde oldukça verimlidir. Polietilen ve polistiren gibi düşük dielektrik kayıp faktörlü malzemelerde iyi sonuç

vermez. Yüksek frekans akımını kaynak dikişine iletmek için elektrotlar kullanılır. Bu proses genellikle filmlerin ve ince levhaların birleştirilmesinde kullanılır. Hızlı proses olmasına rağmen yüksek maliyetli ekipmanlara ihtiyaç duyulur.

3.5 İndüksiyon Kaynağı :

İletken malzemeler yüksek frekans içeren elektromanyetik alana maruz kaldıklarında indüksiyon etkisiyle ısınma ortaya çıkar. Yüksek frekans iletken malzeme üzerinde girdap akımları ile $P=I^2R$ [W] miktarında ısıtma etkisi oluşur. İndüksiyon kaynağı elektrofüzyon (direnç) kaynağının değişik biçimidir. Bu kaynakta metalik direnç birleştirme yapılacak ara yüzeye yerleştirilir ve 200 – 500 kHz aralığında yüksek frekans uygulanır. Yerleştirilen metal kaynaktan sonra da içeride kalır. Yüksek iletkenliği ve yüksek frekans geçirgenliği olmayan plastik parçaların birleştirilmesinde tek parça metal yerleştirme yerine mikron boyutlu metal tanecikleri ve demir oksit ile doldurulmuş termoplastik bantların yüksek frekans altında ısıtılması yöntemi daha yaygın kullanım alanı bulmaktadır. Bu yöntemin iki önemli avantajı mevcuttur. Kompleks geometrilerin birleştirilmesinde kullanılabilir ve tekrar yüksek frekans uygulayarak ısıtılıp bağlantı açılabilir. Dezavantajı ise yerleştirilen metal dolgulu bantların pahalı olması ve dolgu malzemesinin kaynak içerisinde bulunması sebebiyle mukavemet azalmasıdır.

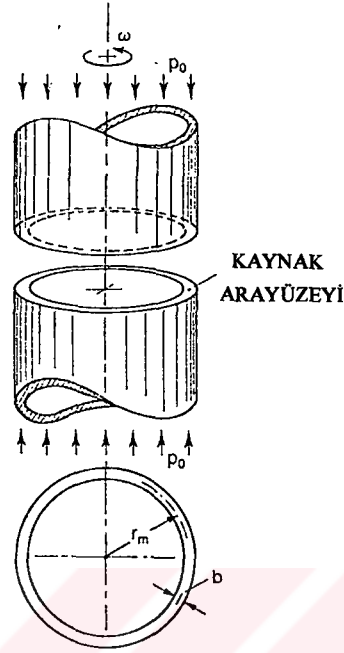
3.6 Elektrofüzyon (Direnç) Kaynağı :

Bu proseste elektrik direnç teli birleştirme yapılacak ara yüzeye yerleştirilir ve elektrik akımı geçmesiyle direnç ısınır. Isı sebebiyle tel çevresindeki plastik erimeye başlar ve enerji kesilmesinden sonra kaynak soğuyarak birleşme sağlanır. Kullanılan metal tel bağlantı içinde kalır. Bu yöntem özellikle polietilen boruların birleştirilmesinde kolay ve hızlı yapılabilmesi sebebiyle tercih edilmektedir. Bu çalışmanın temel konusu olan elektrofüzyon kaynağı detaylı bir şekilde incelenmiştir.

3.7 Sürtünme Kaynağı :

Bu yöntem, birleştirilecek parçalardan biri sabit tutulurken diğerine açısal dönme hızı verilerek sabit parçaya basınçla temas ettirilmesi ve temas yüzeyinde oluşan

sürtünme ısısı sebebiyle polimerde erimenin oluşması ilkesine dayanır. Hareket durduğu zaman erimiş film tabakası katılaşarak kaynak tamamlanmış olur.



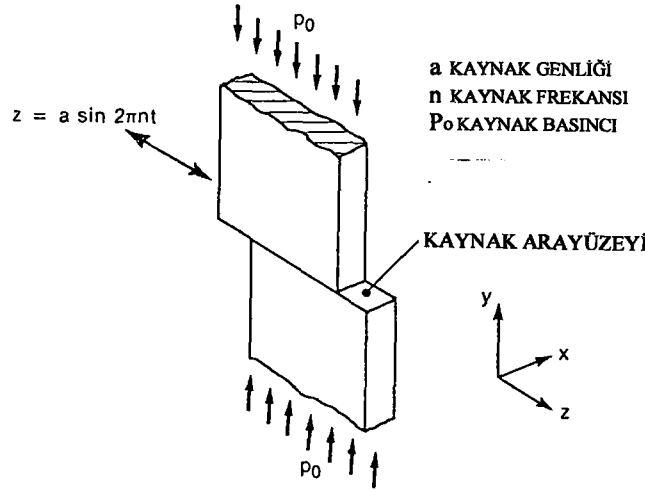
Şekil 3.2 Sürtünme kaynağı geometrisi ve uygulaması

Bu kaynak prosesinin temel parametreleri, dönme hızı, sürtünme basıncı, kaynak süresi ve erimiş film kalınlığıdır. Bu parametreler dönme hızı 1-20 m/s, sürtünme basıncı 80-150 kPa ve kaynak süresi 1-20 sn civarındadır.

3.8 Titreşim (Vibrasyon) Kaynağı :

Doğrusal kaynak veya doğrusal sürtünme kaynağı olarak ta adlandırılan titreşim kaynağında, basınç altında iki parça titreşerek kaynak işini gerçekleştirecek sürtünme ile ısı üretilir. Bu yöntem düz kaynak dikişi olacak termoplastikler için oldukça uygundur. Aynı zamanda küçük kavisli yüzeylere de uygulanabilir.

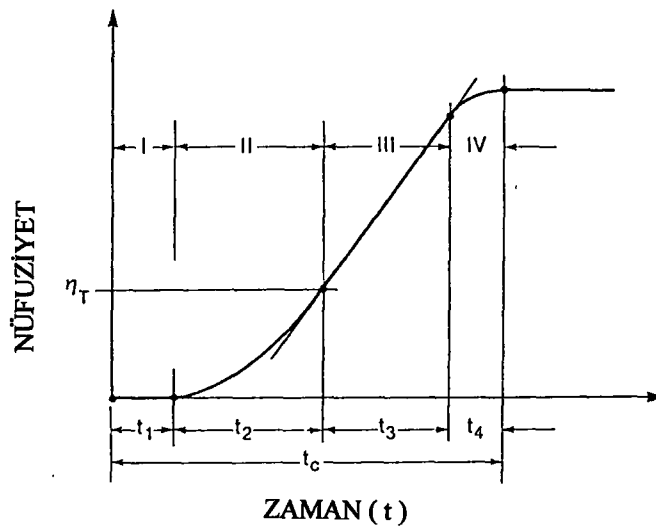
Titreşim kaynağında, birleştirilecek parçalar sabitlenir ve basınç altında bir araya getirilir. Daha sonra parçalar ara yüzey düzleminde ara yüzeydeki kısım eriyene kadar titreştirilir. Titreşim hareketi durdurularak erimiş film tabakasının basınç altında katılaşması beklenir.



Şekil 3.3 Titreşim Kaynağının uygulaması

Titreşim kaynağının temel parametreleri, salınım hareketinin frekansı, hareketin genliği ve kaynak süresidir. Genellikle frekans aralığı 100-500Hz arasında değişmesine rağmen yaygın olarak 100-200Hz aralığı kullanılmaktadır. Genlik ise 0,5 ila birkaç mm arasında değişmektedir.

Titreşim kaynağı, dört aşamada gerçekleşmektedir.[29] Birinci aşamada kuru sürtünme ile ara yüzeyde ısı üretilir ve polimer yumuşak bir yapı sıcaklığına ulaşır. İkinci aşamada ara yüzey erimeye başlar ve ısı üretimi kuru sürtünme yerine erimiş polimerlerde oluşur. Eriyen polimerler artan kaynak nüfuziyetiyle birlikte yanlardan akmaya başlar.



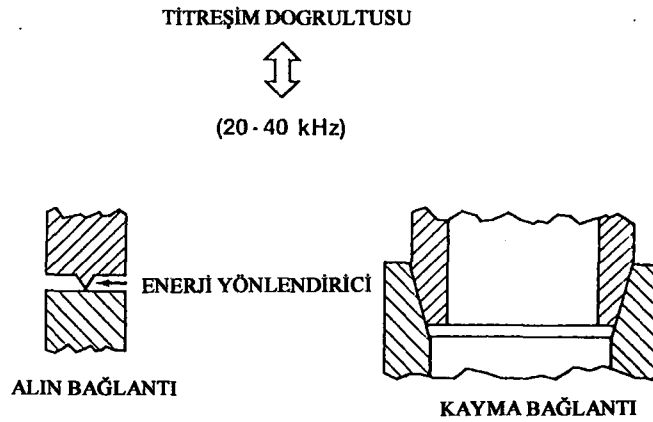
Şekil 3.4 Titreşim kaynağı aşamaları ve kaynak nüfuziyeti

Bu akmadan dolayı parçalar bir birlerine yaklaşır. Üçüncü aşamada erime kararlı hale gelmiştir ve kaynak nüfuziyeti zamanla doğrusal olarak artmaktadır. Dördüncü aşamada, titreşim durdurulmasına rağmen kaynak nüfuziyeti basınç etkisiyle erimiş film tabakasının katılaşana kadar akması sebebiyle bir miktar daha artar. Tüm bu aşamalar şekil 3.4'te gösterilmiştir.

3.9 Ultrasonik Kaynak :

Ultrasonik kaynakta yüksek frekanslı (20 – 50 kHz), küçük genlikli (15 – 60 μm) mekanik titreşimler kullanılarak termoplastik malzemelerin ısıtılarak kaynak edilmesi yöntemine dayanır. Kaynak edilecek parçalar basınç altında bir araya getirilerek ultrasonik titreşime tabi tutulur. Isı üretimi yüzey ve moleküller arası titreşimle sürtünmeden dolayı ortaya çıkar.

Bu yöntemle iki tip birleştirme yapılabilir. Birincisi ve temel olanında ultrasonik titreşimler birleştirilecek yüzeylere normal doğrultuda uygulanır. Bu yöntem düz temas yüzeyine sahip parçalar için uygun değildir. Bunun yerine birleştirilecek yüzeylerden biri üçgen ağızlı bir çıkıntılı yapılır ve bu kısım enerji yönlendirici olarak adlandırılır. İkincisi ise kayma veya kesme birleştirme denilen tiptir. Burada ultrasonik titreşimin uygulandığı esas parça alt birleşme parçasına paraleldir. Bu tip bağlantıda enerji yönlendirici kullanılmaz. Şekil 3.5'te bu durum görülmektedir.



Şekil 3.5 Ultrasonik kaynakta bağlantı şekilleri

Ultrasonik kaynak yöntemi termoplastiklerin kaynağında sıkça kullanılan bir yöntem haline gelmiştir. İşlem süresi saniyeler mertebesinde kısadır. Fakat mevcut uygulamalarda büyük kaynak dikişleri yapılamamaktadır. Ayrıca elastomer gibi termoplastiklerde uygun bir yöntem değildir.

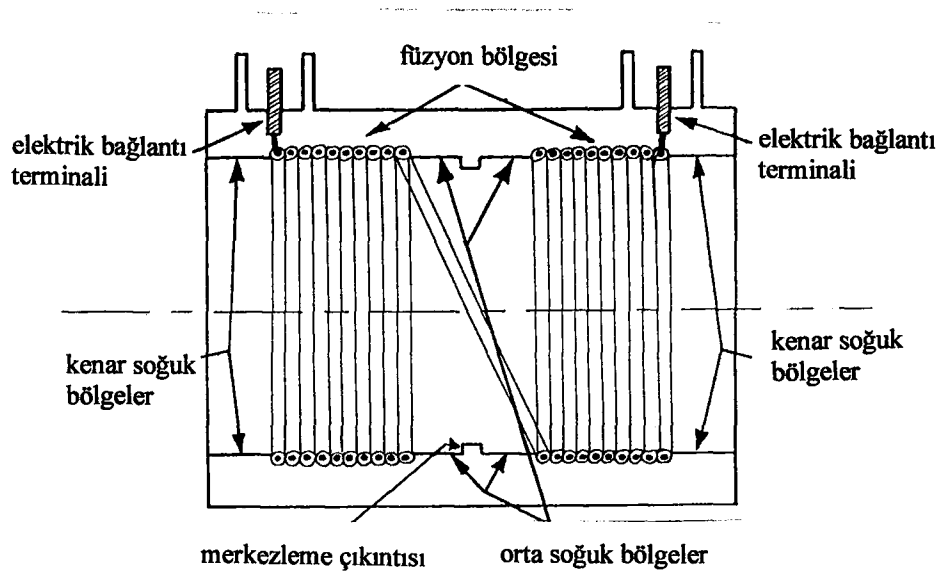


4. ELEKTROFÜZYON KAYNAK YÖNTEMİ :

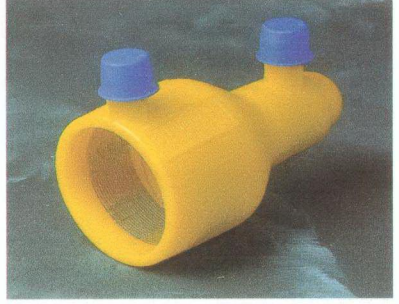
4.1 Elektrofüzyon Bağlantı Elemanları :

Elektrofüzyon kaynak yöntemi bir çok avantajları sebebiyle polietilen boruların birleştirilmesinde tercih edilmektedir. Elektrofüzyon kaynağının uygulanması kolaydır ve kullanılan ekipmanlar fazla pahalı değildir. Kaynak kalitesi diğer yöntemlerle kıyaslandığında iyi konumdadır. Elektrofüzyon kaynağında diğer parametrelerle birlikte elektrofüzyon ek parçasının geometrisi büyük öneme sahiptir. Şekil 4.1 de bir elektrofüzyon manşonun yapısı görülmektedir. İki temel elemandan oluşmaktadır. Bunlar polietilen manşon ve iç yüzeyinde yarı gömülü halde bulunan iletken tel sargıdır.[30] Elektrofüzyon ek parçaları şekil 4.2’de görüldüğü gibi manşon, T parçası, redüksiyon ve branşman T bağlantısı olarak kullanılır.

Elektrofüzyon bağlantıda, uç uca birleştirilecek her iki burunun ucu manşona geçirilir. Manşonun tam ortasında buluna çıkıntı sayesinde montaj merkezlenmiş olur. Bu çıkıntının bulunmadığı durumlarda boru uçları manşon ortasına gelecek mesafede ölçülüp işaretlenerek monte edilir.



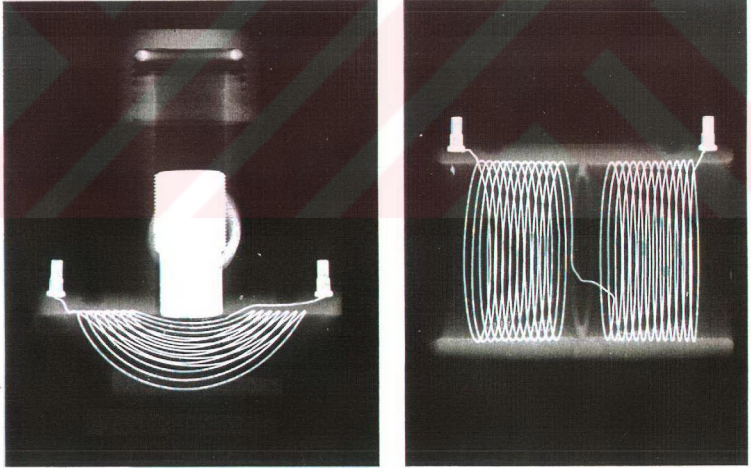
Şekil 4.1 Elektrofüzyon manşonun yapısı



Şekil 4.2. Çeşitli Elektrofüzyon Bağlantı Elemanları

Boru ve manşon montajı yapıldığında ısıtıcı teller boru dış yüzeyi ile manşon iç yüzeyi arasında kalır. Güç kaynağından verilen elektrik enerjisi sebebiyle teller ısınır ve etrafındaki polietilen erimeye başlar. Bu eriyen polietilen, manşonun dış tarafına ve orta kısmına denk gelen soğuk bölgelerde ısılarını vererek katılaştır. İçerideki eriyen kısım füzyon bölgesi olan tel bölgesine hapsolür ve eriyen polietilenin genleşmesi ile basınç artar. Böylece boru dış yüzeyi ile manşon iç yüzeyine isabet eden füzyon bölgesinde her iki malzeme eriyik oluşturarak karışırlar. Enerji kesildikten sonra eriyen kısımlar katışlaşmaya başlar ve tamamen katışlaşma olduğıunda kaynak tamamlanmış olur.[31]

Elektrofüzyon bağlantı elemanında en önemli kısım ısıtma elemanı olan elektrik telidir. Bu tel saf bakırdan, manganez nikel alaşımına kadar değışik malzemelerden yapılır. Bir elektrofüzyon manşon ve bransman T bağlantı elemanında tellerin yerleşimi şekil 4.3'te görülmektedir.



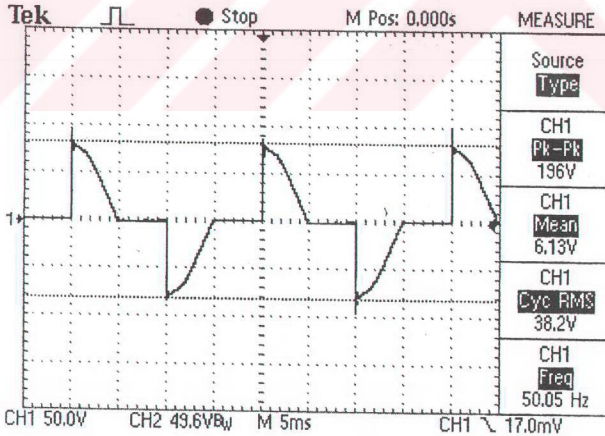
Şekil 4.3 Elektrofüzyon bransman T ve manşonda tellerin yerleşimin X ışını altında görüntüşü

4.2 Elektrofüzyon Kaynak İşleminin Uygulanışı :

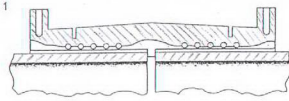
Bir elektrofüzyon kaynak işlemi dört ana aşamadan oluşur.[32,33]

- 1) Kaynaklanacak boru yüzeyinin hazırlanması : Polietilen ultraviyole ışınlarına karşı hassas olması ve hızla oksitlenmesi sebebiyle boru yüzeyindeki 0,1 – 0,25 mm'lik tabaka kazınarak atılır. Bu kazımadan sonra yüzeyde oluşabilecek yağ, toz gibi maddeler polietilene zarar vermeyen isopropil alkol gibi bir çözücü ile temizlenir.
- 2) Boru ve ek parçası monte edilir ve pozisyoner adı verilen aletlerle kaynak sırasında hareket etmemeleri için sabitlenir. Bu pozisyonerler soğuma süresi bitimine kadar sökülmez.
- 3) Uygun bir güç kaynağı ile belli bir sabit gerilimde elektrik enerjisi belli bir süre verilir. Erime gerçekleştirilir.
- 4) Elektrik enerjisi kesilir ve soğuma evresi başlar. Soğuma süresi tüm erimiş bölgenin tam katılaşma sıcaklığı olan 110 °C'nin altına düşene kadar beklenir. Bu esnada kaynak hareket ettirilmez.

Tüm bu aşamalar şekil 4.5'te adım adım görülmektedir.

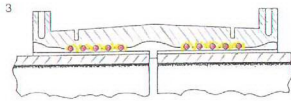
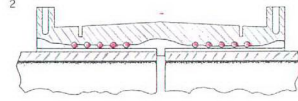


Şekil 4.4 Elektrofüzyon kaynağında uygulanan elektrik gerilimin osiloskopta görünüşü



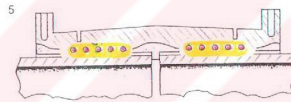
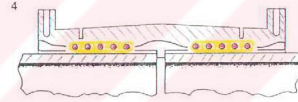
1) Boru ve manşon montaj edilir ve kaynak esnasında hareket etmemesi için sabitlenir.

2) Isıtıcı tellere elektrik enerjisi verilir



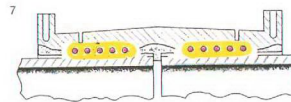
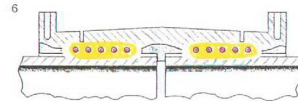
3) Tel sarımının etrafındaki polietilen erimeye başlar.

4) Isı ve erime etkisiyle genişleyen manşon boru yüzeyi ile temas eder.



5) Polietilen manşonla beraber boru da erimeye başlar.

6) Soğuk bölgelerde eriyen polietilen katılaşır ve böylece erimiş bölgeyi muhafaza eder.

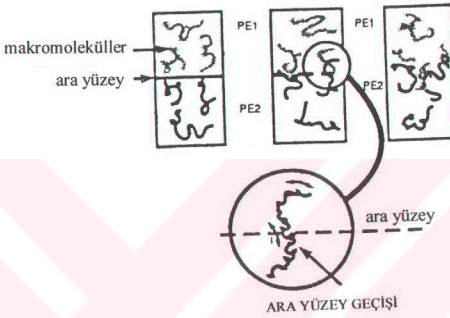


7) enerji kesilme anında erimiş kısım kalınlığı, sıcaklığı maksimuma ulaşır. Enerji kesilmesiyle soğumaya başlar.

Şekil 4.5 Elektrofüzyon kaynağı aşamaları

4.3 Polietilen Kaynak Mekanizması :

Polietilen erime noktası üzerine ısıtıldığında, elektrofüzyon yöntemiyle birleştirilecek her iki yapıdaki moleküler zincirler ara yüzeylerden difüzyonla diğer tarafa geçerler. Böylece zincirler birbirleri ile karışırlar. Ortalama difüzyon derinliği sıcaklığa ve bu sıcaklıkta kaldığı süreye bağlıdır. [34]



Şekil 4.6 Polietilen kaynağında moleküler difüzyonla bağların oluşumu

Ara yüzey sıcaklığında kalma süresinin artmasıyla birlikte daha fazla difüzyon gerçekleşir. Böylece bağlantının mukavemeti ve sürekliliği artar.[31] Ortalama difüzyon derinlik mesafesi (χ) sabit sıcaklık için,

$$\chi(t) = t^{1/4} \cdot M^{-1/4} \quad (4.1)$$

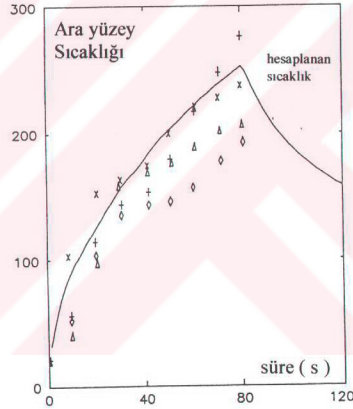
olarak verilmiştir. Burada M polietilenin moleküler ağırlığı, t ise zamandır. Buradan görülebileceği gibi düşük moleküler ağırlığa sahip olanlar ara yüzeyden daha kolay bir şekilde difüzyonla geçerek yeterli olmayan füzyon sürelerinde gevrek yapı oluşturacaklardır. Fakat düşük sıcaklıklarda (erime noktasının hemen üzerinde), yüksek moleküler ağırlığa sahip olanlar için çok uzun sürelere ihtiyaç vardır. Bu sebeple söz konusu kritik durum için minimum ara yüzey sıcaklığı yaklaşık 150 °C olarak verilmiştir.[12] Bununla birlikte düşük sıcaklıklar için pratikte kabul edilebilir bir füzyon süresi ve polietilenin yapısını bozulabileceği sıcaklık (yaklaşık 300 °C - 350 °C) kısa füzyon süreleri için sınırlayıcı olmaktadır.

4.4 Literatür Araştırması :

Termoplastik boruların elektrofüzyon yöntemiyle birleştirilmesine yönelik sınırlı sayıda çalışma yapıldığı literatür araştırmasında görülmüştür. Yayınlanan bu çalışmalar daha çok elektrofüzyon prosesinin ısıl modellemesi ve füzyon parametrelerinin kaynak mukavemetine etkisinin belirlenmesine yönelik olmuştur.

Elektrofüzyon kaynağın modellemesi ile ilgili ilk çalışma Pitman [5] tarafından 1985 yılında yayınlandı. Şekil 4.7'de görülen bir boyutlu ısı transferi modelini kurdu. Pitman, ısıtıcı tarafından verilen enerjinin tel çapına eşit bir katman tarafından füzyon bölgesinden sağlandığı kabulünü yaptı.

Uniform ısıtılan katman



Şekil 4.7 Polietilen borunun elektrofüzyon kaynağı için bir boyutlu model ile deneysel ve sayısal sonuçların karşılaştırılması [5]

Boru ile manşon arasındaki montaj boşluğunun ihmal edilebileceğini dikkate aldı. Pitman iki temel ısı transferi denklemini sıcaklığa bağlı malzeme özelliklerini göz önünde bulundurarak ifade etti.

Polietilen yapı içerisinde ,

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right) = \rho(T) c(T) \frac{\partial T}{\partial t} \quad (4.2)$$

Isıtıcı katman içerisinde ,

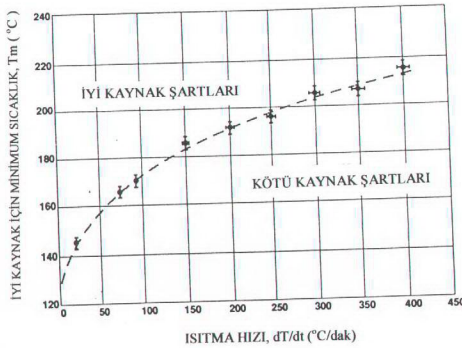
$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right) + H(t, T) = \rho(T) c(T) \frac{\partial T}{\partial t} \quad (4.3)$$

Sınır koşulları olarak manşon dış yüzeyindeki ve boru iç yüzeyindeki taşınım ısı transferi durumunu tanımladı. Bu eşitlikleri sonlu farklar yöntemini kullanarak çözdü. Kurulan model sonucu elde edilen teorik ve deneysel sonuçların birbirlerini hassas bir şekilde karşılamamasına rağmen, elektrofüzyon kaynak modellemesi üzerine yönlendirici bir çalışma niteliğindedir.

Sain-Royre, Gueugnaut ve Revert [6], yaptıkları çalışmada ısıtma oranının bir fonksiyonu olarak iyi bir kaynak için minimum ara yüzey sıcaklığını veren $16 \times 6 \text{ mm}^2$ boyutunda 0,38 mm kalınlığında dikdörtgen polietilen deney parçası üzerinde bir çalışma yaptılar. Bu çalışma sonucunda ampirik olarak,

$$T_m = 4,3(dT/dt)^{1/2} + 401,4 \quad (4.4)$$

Burada T_m minimum ara yüzey sıcaklığı (K), T sıcaklık, t zamanı göstermektedir. Bu eşitlikten görüleceği üzere iyi bir kaynak için yüksek ısıtma hızında yüksek sıcaklığa ihtiyaç vardır. Şekil 4.8'den de görüleceği üzere dT/dt nin sıfır olduğu T_m değeri 128 °C polietilenin erime sıcaklığı olmaktadır.



Şekil 4.8 Polietilen levhanın iyi kaynak edilebilirliği

Nussbaum, Meister ve Dufour [7] tarafından boşluksuz ve tam temas kabulü yapılarak laboratuvar ortamında levha halinde model oluşturuldu. Bu çalışmada ısı iletim katsayısı k ve özgül ısı c değerlerinin sıcaklıkla değişmediği kabulü yapılarak,

$$c \frac{\partial T}{\partial t} - \text{div}(k \text{ grad} T) = 0 \quad (4.5)$$

$$c \frac{\partial T}{\partial t} - k \Delta T = 0 \quad (4.6)$$

denklemleri ile lineer model kuruldu. Daha sonra ısı iletim katsayısı k ve özgül ısı c sıcaklıkla değişimi ile birlikte faz değişimindeki entalpi değişimi göz önünde bulundurularak bir boyutlu lineer olmayan modeli kurdular. Buna göre tel yerine katmanı dikkate alarak ,
katı polietilen yapı içerisinde,

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha_s \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (4.7)$$

Füzyon sırasında,

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha_s \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \dot{\omega} \quad (4.8)$$

Erimiş polietilen yapı içerisinde,

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha_l \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (4.9)$$

denklemleri kurdular.

Burada,

T : malzeme sıcaklığı

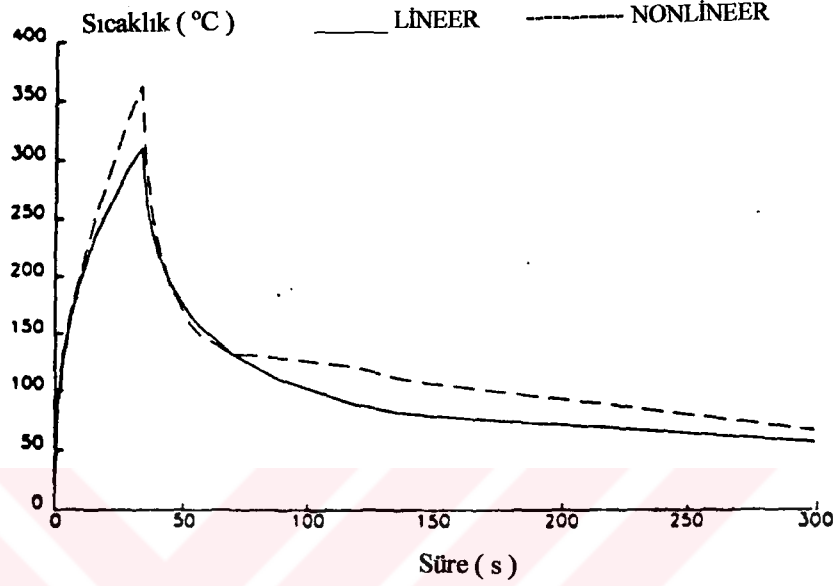
t : zaman

α : ısı yayılım katsayısı

$\dot{\omega}$: faz değişim ısısı

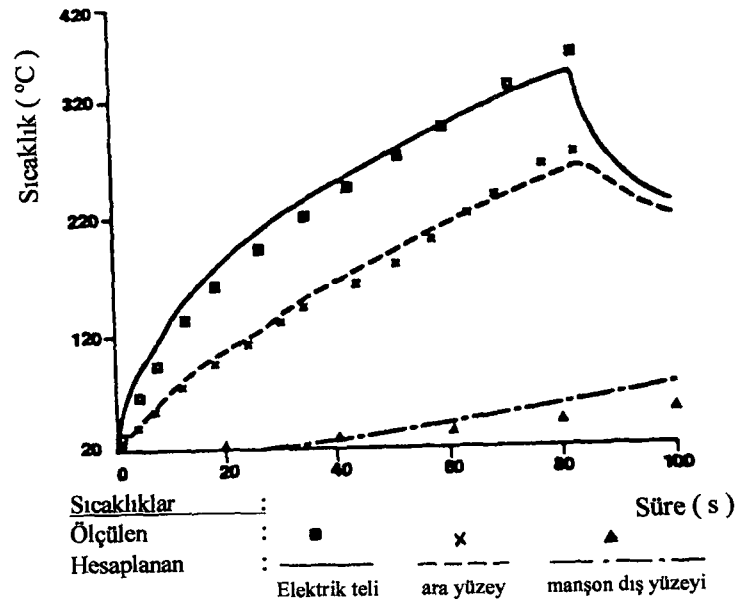
indisler s ve l sırayla katı ve erimiş halleri göstermektedir.

Şekil 4.9'da gösterilen lineer çözüm ve lineer olmayan çözüm sonuçlarını karşılaştırdılar. Lineer modelin basit ve temel eğilimi göstermesi açısından yeterli olmasına rağmen lineer olmayan modelin daha gerçekçi sonuçlar verdiği raporladılar.



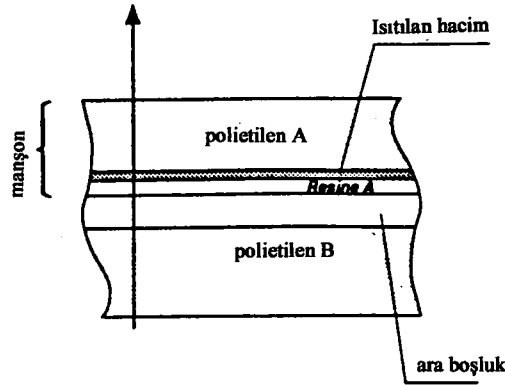
Şekil 4.9 Lineer ve lineer olmayan model sonuçlarının karşılaştırılması [7]

Kurulan modelden elde edilen sonuçlar deneysel sonuçlarla karşılaştırıldığında şekil 4.10'da görüldüğü gibi uyumlu olduklarını gördüler. Fakat kurulan model ve sonuçlar için elektrofüzyon kaynağını tanımlamak için oldukça basit bir yaklaşım yapıldığı söylenebilir.



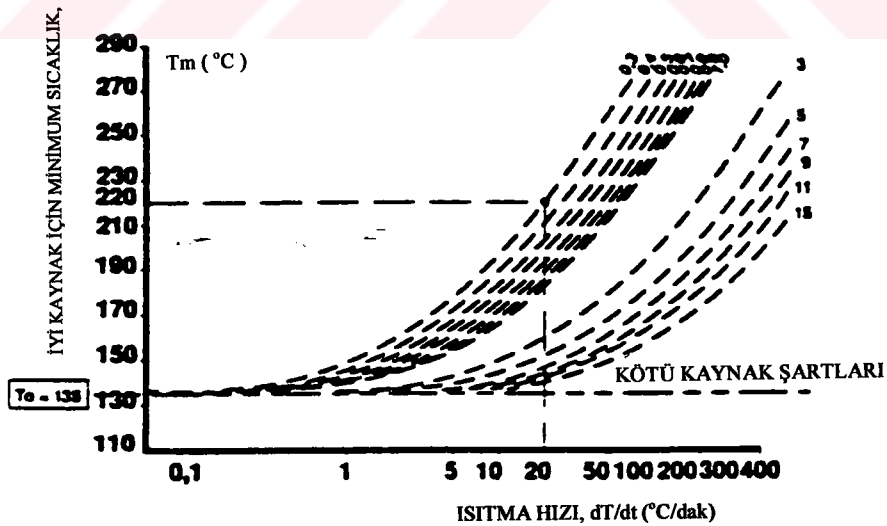
Şekil 4.10 Deney parçası için ölçümlerle sayısal çözümlerin karşılaştırılması

Polietilen boruların elektrofüzyon kaynağı ile ilgili olarak, boru manşon arasındaki montaj boşluğu, ısınmayla birlikte ısıl genişlemeyi dikkate alarak daha detaylı bir çalışma Nussbaum, Dufour ve Gueugnaut [8] tarafından bir boyutlu olarak yapıldı.

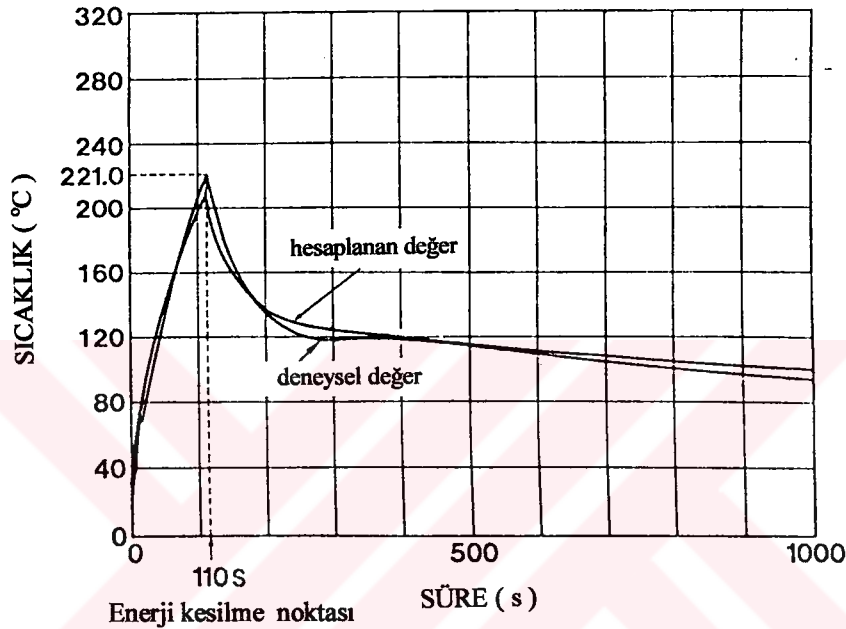


Şekil 4.11 Basitleştirilmiş elektrofüzyon modellemesi

Bu çalışmada polietilen malzemenin makromolekül difüzyonu üzerine kurulu olarak iyi bir elektrofüzyon kaynak birleşimi için minimum ara yüzey sıcaklığını veren nümerik bir model geliştirdiler ve yaptıkları deneylerle bu modelin geçerliliğini tespit ettiler. [8] Bu çalışmada değişik polietilen çiftleri için ara yüzey difüzyon katsayısı kavramını tanımlayarak ısıtma hızına bağlı olarak iyi bir elektrofüzyon kaynağı için şekil 4.12’de görülen minimum ara yüzey sıcaklığı değerlerini verdiler



Nakashiba, Nishimura ve Inoue [12] sonlu elemanlar yöntemini kullanarak CASTEM adını verdikleri bir bilgisayar programı hazırladılar. 50 mm çapındaki manşonun simülasyonu, erimedeki gizli ısıyı dikkate alarak lineer olmayan zamanla değişen ısı transferi analiziyle çözdüler. Çalışmada manşon boru arasındaki boşluk ihmal edildi. Çalışma sonucunda Şekil 4.13'te görüldüğü gibi hesaplanan sıcaklık eğrisi ile deneysel sonuçların iyi bir uyum içinde olduğu görüldü.

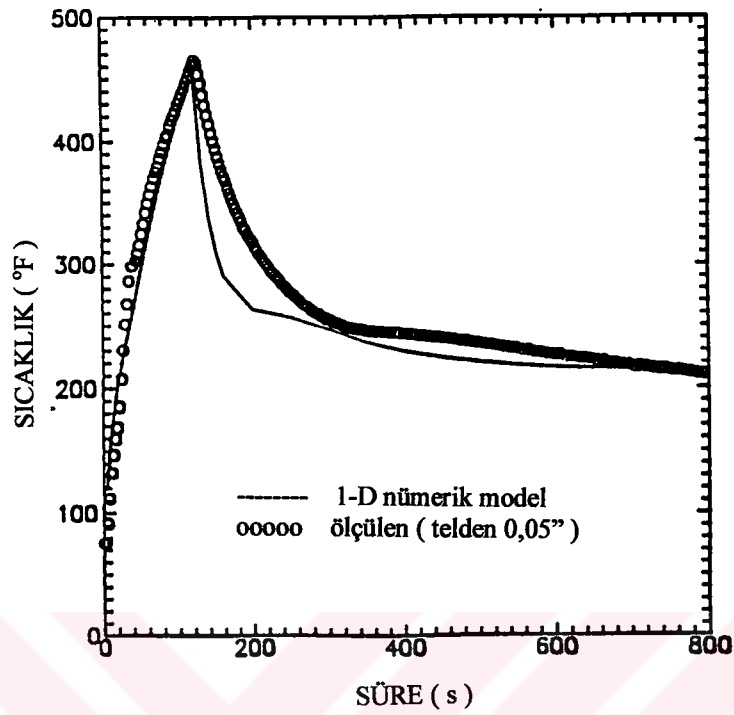


Şekil 4.13 Polietilen 50 mm çapındaki boru manşon kaynağı için sayısal ve deneysel sonuçların uyumu

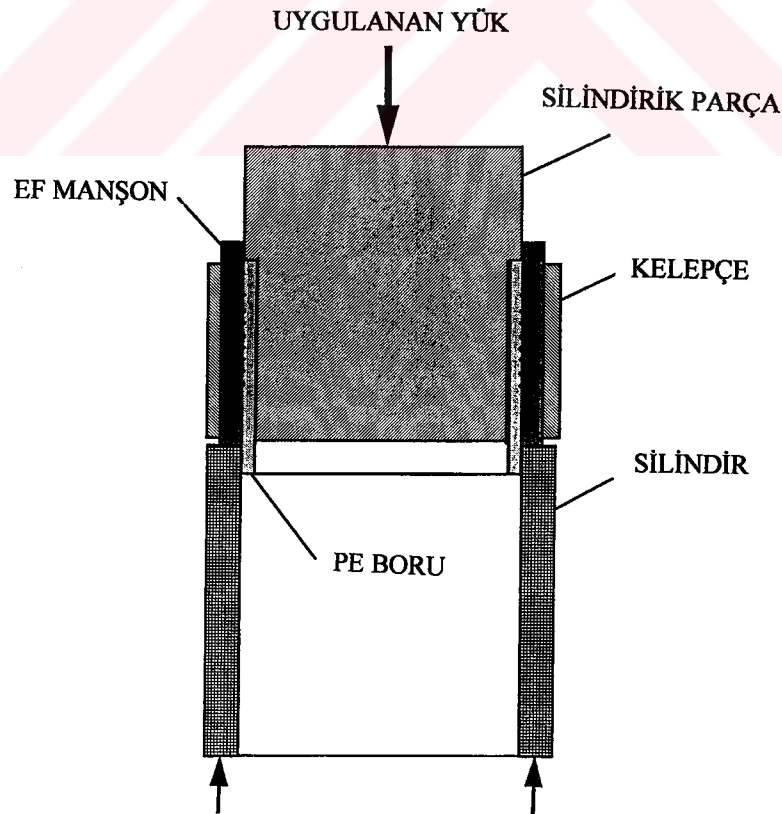
Kanninen, O' Donoghue ve Buczala [35] elektrofüzyon kaynak bağlantısının kalitesinin belirlenmesi için ABAQUS paket program kullanarak bir çalışma yaptılar. Çalışmalarında sıcaklıkla değişen malzeme özelliklerini, gizli ısıya ve manşon boru arasındaki boşluğu dikkate aldılar. Bir boyutlu yaptıkları çalışmada, ısıtma bölgesinin orta noktasındaki sıcaklık profilinin bilinmesinin kaynak kalitesinin belirlenmesi için yeterli kabul ederek şekil 4.14'te görülen sonuçları elde ettiler.

Amerika Birleşik Devletlerinde Grigory, Maguine ve Deviney [32] yaptıkları çalışma ile elektrofüzyon kaynağında uygulanan güç, ara yüzey basıncının ara yüzey sıcaklığına etkisini ve bununla birlikte kaynak mukavemetine etkisini incelediler. Kaynak mukavemetinde standart sıyırma (peeling) testi yerine, manşon boru kaynak

bölgesine kayma gerilmesi (shear test) yaklaşımını getirdiler. Sonuçlar şekil 4.15'te görülmektedir.



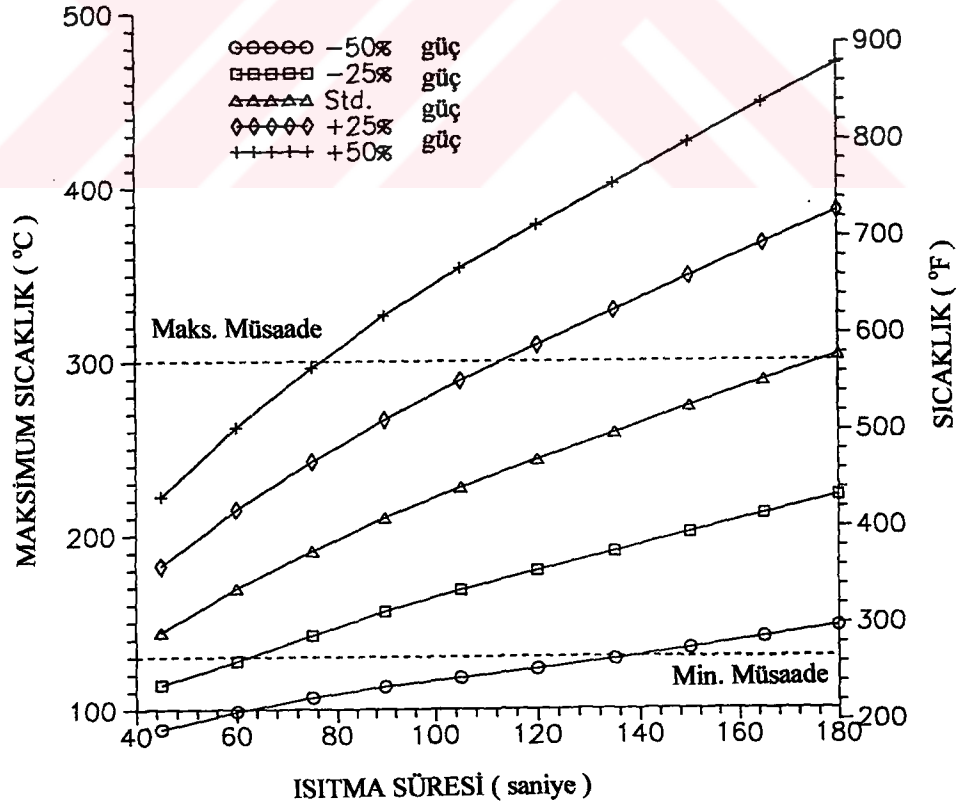
Şekil 4.14 Elektrofüzyon 4" manşon için teorik ve deneysel sonuçların karşılaştırılması



Şekil 4.15 Elektrofüzyon kaynak mukavemeti için kayma testinin şematik görünüşü

Bu çalışmayla ASTM F1055 standardındaki [36] mukavemet testlerine göre geliştirdikleri yöntemin daha geçerli olduğunu ifade ettiler. Ayrıca elektrofüzyon yönteminin kazıma derinliği, füzyon zamanı, çevre sıcaklığının geniş bir aralıkta değişmesine rağmen kaynak mukavemetinde önemli bir kayıp olmadığı sonucuna vardılar. Buna rağmen füzyon ara yüzeyindeki kirliliğin kaynak mukavemetine olumsuz etkide bulunduğunu tespit ettiler.

Southwest Research Institute araştırmacıları O'Donoghue, Green ve Kanninen [10] Amerikan Gas Research Institute adına yaptıkları çalışmayla, iki boyutlu olarak 4 inch boru manşon elektrofüzyon kaynağının simülasyonunu ABAQUS paket programını kullanarak çözdüler. Burada ısıtıcı teller yerine bu kısımda aynı ısı üretimini sağlayan polietilen katmanı şeklinde modelleme yaptılar. Yaptıkları çalışma sonucunda çeşitli mevcut elektrofüzyon manşonlar için ara yüzey sıcaklığı, ara yüzey basıncı, eriyen kısım kalınlıkları için çeşitli polinomlar verdiler. Ayrıca güç kaynağından verilen güç ile füzyon süresinin ara yüzey sıcaklığına etkisini incelediler. Sonuçlar şekil 4.16'da görülmektedir.



Şekil 4.16 4" çapındaki polietilen boru manşon kaynağı için değişik güçlerde zamanın fonksiyonu olarak hesaplanan maksimum sıcaklıklar

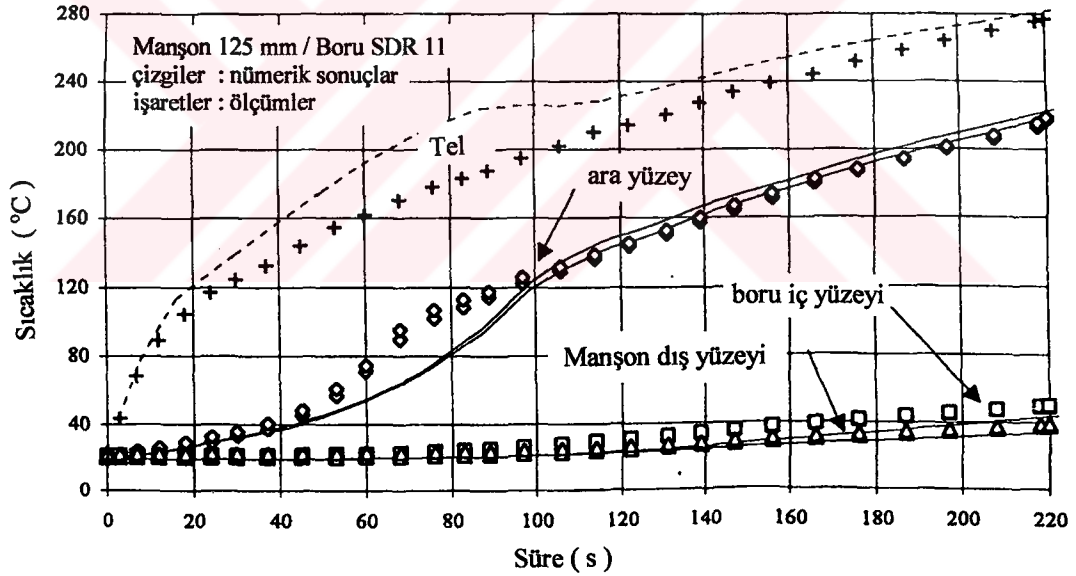
Rosala, Day ve Wood [11] sonlu elemanlar yöntemini kullanarak termoplastik boruların elektrofüzyon kaynağını modeli kurarak ABAQUS paket programı yardımıyla çözdüler. Bu modelde ısı transferi analizi ile birlikte ısıl deformasyonu birlikte kullandılar. Boru manşon temas yüzeyleri için ısı transferini ısıl temas direncini dikkate alarak aşağıdaki şekilde ifade ettiler.

$$f_q = h(T_A - T_B) \quad (4.10)$$

$$h = k / d$$

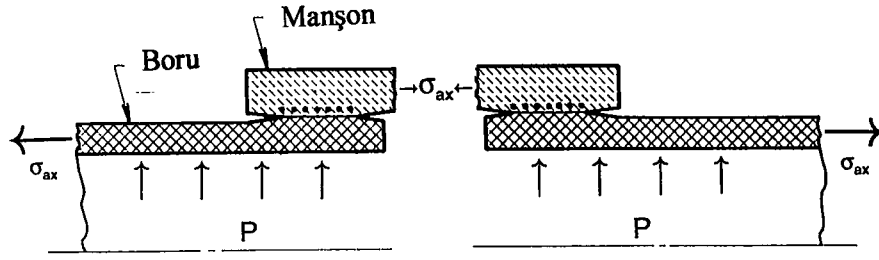
Burada , k ara boşluğun ara ısı iletim katsayısı, d ara boşluk mesafesi, T_A ve T_B her iki yüzeyin sıcaklıklarını göstermektedir.

Yaptıkları çalışma ile deneysel sonuçları karşılaştırarak şekil 4.17’de görüldüğü gibi iyi bir yaklaşım elde ettiklerini raporladılar.



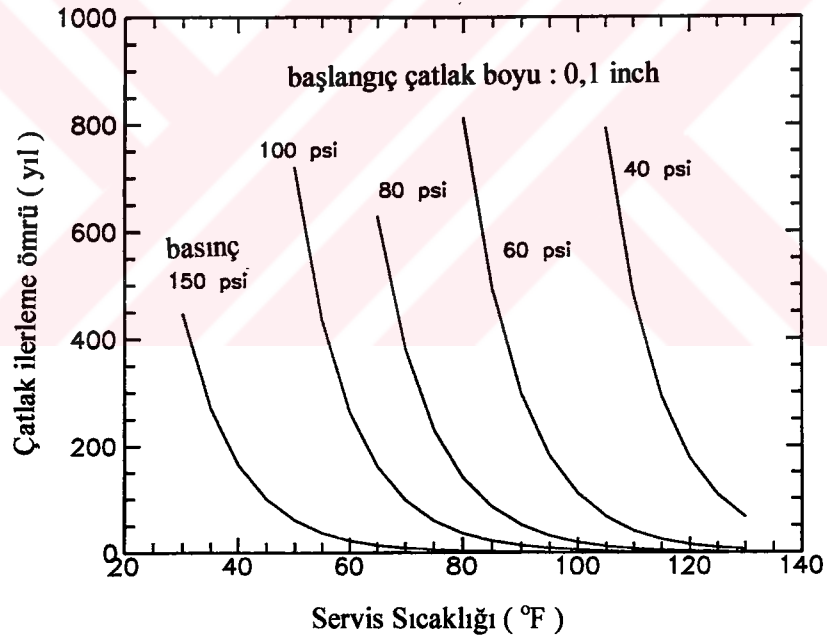
Şekil 4.17 Isıtma periyodu için deneysel ve teorik sonuçların karşılaştırılması

Yine Southwest Research Institute araştırmacıları Kuhlman, Chell, Kanninen ve Deel [37] polietilen gaz borularının elektrofüzyon kaynağının ömür tahmini çalışmasını yaptılar. Elektrofüzyon manşon boru kaynağı üzerine gelen şekil 4.18’de görülen gerilme ve yükleri belirleyerek çatlak ilerlemesini incelediler



Şekil 4.18 Elektrofüzyon manşon boru kaynağında etki eden iç basınç ve gerilmeler

Kaynak bağlantısının muhtemel çeşitli noktalarında başlayan çatlak başlangıçları için çeşitli çalışma şartları altında servis ömrü ile ilgili sonuçlar şekil 4.19'da görülmektedir.

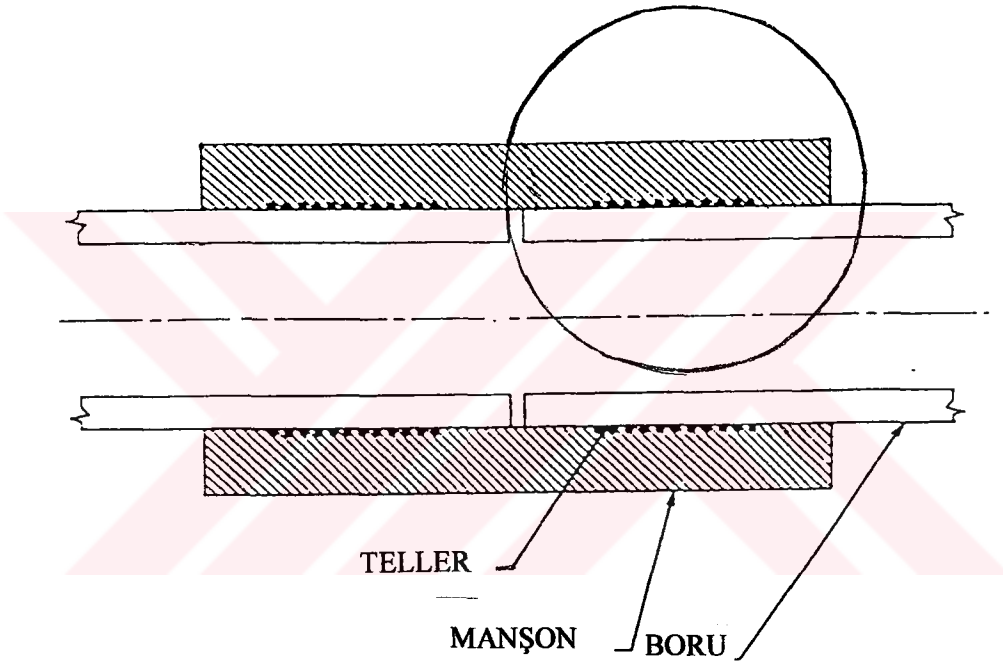


Şekil 4.19 4" polietilen boru manşon kaynağı için iç soğuk kısımdaki 0,1" boyundaki başlangıç çatlağı için çeşitli çalışma basınçlarda çatlak ilerlemesi servis ömrü

5. ELEKTROFÜZYON KAYNAĞI MATEMATİK MODELİ :

5.1. Sistem Tayini ve Genel Enerji Denklemi :

Elektrofüzyon manşon ile polietilen boru montajı Şekil 5.1’de görülmektedir. Burada görüldüğü gibi çevresel olarak ve her iki boru bağlantısı itibariyle simetriktir. Bu simetrik durumda dolayı teorik çözüm çember içerisine alınan kısım için yapıldı.



Şekil 5.1 Elektrofüzyon manşon ve polietilen boru montajı ve sistem seçimi

Kurulan matematik model, iki boyutlu ısı transferi üzerine, sıcaklıkla değişen ısı iletim katsayısı, yoğunluk, faz değişimi ve bu faz değişimi özgül entalpi tanımı yaparak çözümde kullanılmasını ve elektrik etkisiyle tellerde ısı üretimini içermektedir.

Polietilen boruların elektrofüzyon yöntemiyle birleştirilmesinde, kartezyen koordinatlarda sıcaklıkla değişen malzeme özellikleri göz önünde bulundurularak, erime ve soğuma periyotları için elektrik enerjisi ile ısı üretimi dikkate alınarak, zamana bağlı iki boyutlu ısı transferi denklemi aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) + \dot{q} \quad (5.1)$$

Burada $\dot{q}$ [W/m³] ısı üretimi, elektrik enerjisinin tellere uygulanması ile ortaya çıkan ısıdır. L_w [m] boyundaki R [ohm] direncindeki tele U [volt] sabit gerilimi uygulandığında ,

$$\dot{w}_e = \frac{U^2}{R} \quad (5.2)$$

ısı üretimi gerçekleşir. [38,39] Isıtıcı tel direnci R sıcaklıkla değiştiğinden $\dot{w}_e$ ısı üretimi de değişmektedir. Başlangıç sıcaklığı T_0 'da R_0 direnç değerine sahip telin sıcaklık katsayısı α_w [1/°K] ile lineer değişmektedir.[40]

$$R = R_0(1 + \alpha_w \Delta T) \quad (5.3)$$

$$\Delta T = T - T_0$$

(5.3) eşitliği (5.2)'de yerine konulursa değişken sıcaklıkla ısı üretimi ifadesi elde edilir.

$$\dot{w}_e = \frac{U^2}{R_0(1 + \alpha_w \Delta T)} \quad (5.4)$$

Tel direnci R , öz direnç γ , tel boyu L_w ve kesiti A_w cinsinden ifade edilirse ;

$$R = \frac{L_w \gamma}{A_w} \quad (5.5)$$

Burada öz direnç γ 'nın sıcaklıkla lineer değiştiği bilindiğine göre,

$$\gamma = \gamma_0(1 + \alpha_w \Delta T) \quad (5.6)$$

(5.5) eşitliği aşağıdaki şekle dönüşür.

$$R = \frac{L_w \gamma_0 (1 + \alpha_w \Delta T)}{A_w} \quad (5.7)$$

Bu durumda (5.4) denklemini öz direnç, tel boyu ve kesiti dikkate alınarak aşağıdaki şekilde de ifade etmek mümkündür.

$$\dot{w}_e = \frac{U^2 A_w}{L_w \gamma_0 (1 + \alpha_w \Delta T)} \quad (5.8)$$

(5.1) denkleminde ifade edilen birim hacim için ısı üretimi $\dot{q}$ yazılırsa ,

$$\dot{q} = \frac{\dot{w}_e}{L_w A_w} \quad (5.9)$$

(5.4) ifadesi yerine konulursa ,

$$\dot{q} = \frac{U^2}{R_0 (1 + \alpha_w \Delta T) L_w A_w} \quad (5.10)$$

elde edilir. (5.10) eşitliği öz direnç dikkate alınarak (5.8) ifadesi (5.9)'da yerine konulursa aşağıdaki şekilde de ifade edilebilir.

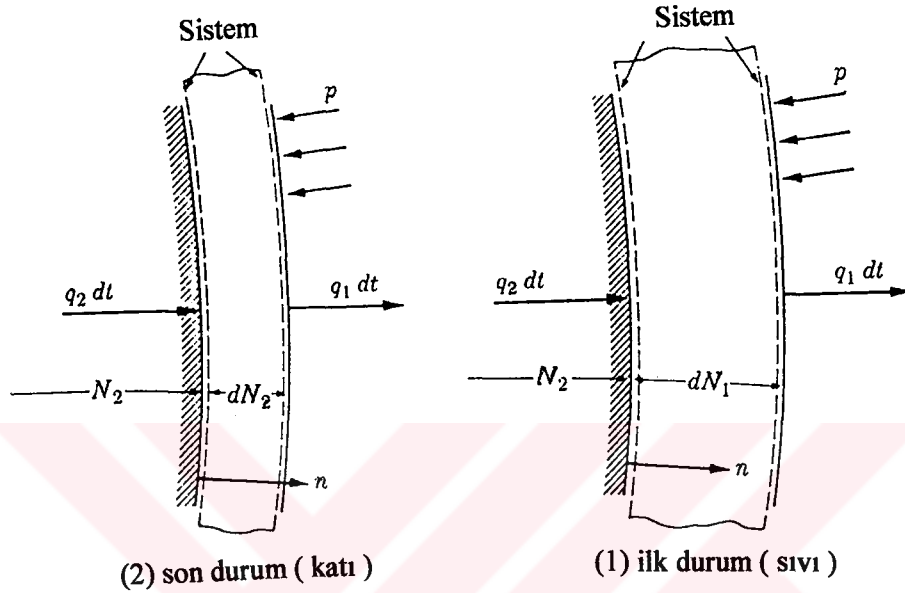
$$\dot{q} = \frac{U^2}{\gamma_0 (1 + \alpha_w \Delta T) L_w^2} \quad (5.11)$$

5.3 Faz Değişimi :

Polietilen boruların elektrofüzyon kaynağı işleminde erime ve katılaşma durumu için faz değişimi büyük önem arz etmektedir. Faz değişimi problemini polietilenin erime ve katılaşma konusundan önce daha basit hali olan sıvının örneğin suyun katılaşması

üzerine tartışalım. Burada 1 indisi sıvı hali, 2 ,indisi katı hali göstermektedir. Sıvı ve katı halde yoğunluklar farklı olduğu için dt zaman aralığında dN_1 sıvının kalınlığından dN_2 katı kalınlığı oluşur.[41]

Şekil 5.2'deki sistem üzerine termodinamiğin birinci kanunu uygulayalım.



Şekil 5.2 Faz değişimi problemi sistem ve yükler

$$\rho_2 u_2 dN_2 - \rho_1 u_1 dN_1 = q_2 dt - q_1 dt - p(dN_2 - dN_1) \quad (5.12)$$

Burada ,

dN_1 : başlangıçtaki sıvının kalınlığı

dN_2 : son haldeki katının kalınlığı

p : basınç

süreklilik denklemi,

$$\rho_2 dN_2 = \rho_1 dN_1 \quad (5.13)$$

faz değişim ısısı ,

$$L = h_1 - h_2 \quad (5.14)$$

Dikkate alınarak (5.12) denklemi yeniden düzenlenirse,

$$-\rho L \frac{dN_2}{dt} = q_2 - q_1 \quad (5.15)$$

haline gelir.

q_1 ve q_2 için Fourier kanunu ifadeleri konulursa,

$$-\rho L \frac{dN_2}{dt} = \pm k_2 \left(\frac{\partial T_2}{\partial n} \right) - \left[\pm k_1 \frac{\partial T_1}{\partial n} \right] \quad (5.16)$$

eşitliğini elde ederiz. Buradaki artı ve eksi işaretleri yüzey normal diferansiyelinin katı yüzeye doğru veya dışarıya olması durumunu gösterir.

Katılaşma hızı ,

$$V_2 = \frac{dN_2}{dt} \quad (5.17)$$

yazılır. Bu durumda (5.16) ifadesi ,

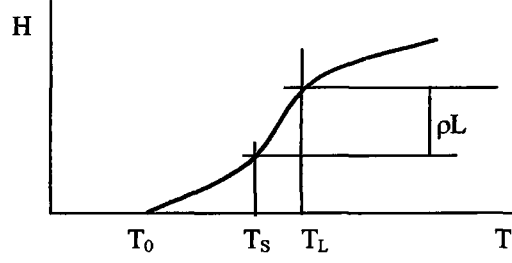
$$\left[k \frac{\partial T}{\partial n} \right]_1^2 = -\rho L V_n \quad (5.18)$$

şekline dönüşür. Burada 1 ve 2 indisleri fazları, L ise faz değişim ısısını gösterir.

Faz değişim ara yüzeyinde katı ve sıvının sıcaklıkları birbirlerine eşittir ve bu da erime/katılaşma sıcaklığıdır.[42]

$$T_1 = T_2 = T_m \quad (5.19)$$

Elde edilen (5.18) ifadesi doğrudan katı fazdan sıvı faza veya sıvı fazdan katı faza geçişi içerir. Polietilenin erimesinde ve katılaşmasında doğrudan faz değişimi yerine geçiş bölgesi olan yumuşak bölge mevcuttur. Bu durumda iki faz değişim ara yüzeyi yazılabilir. Faz değişim ısısı şekil 5.3'te gösterilen katılaşma sıcaklığı T_s ve erime sıcaklığı T_L arasındaki bölgede çekilir veya verilir.



Şekil 5.3. Polietilen için Entalpi Fonksiyonu

Katılaşma sıcaklığı T_s ve erime sıcaklığı T_L arasındaki yumuşak bölge 2 indisi, katı bölge 1 indisi ve tamamen erimiş polietilen ise 3 indisi ile ifade edilir.

Geçiş bölgesinde faz değişim ısısı katılaşma sıcaklığı T_s ve erime sıcaklığı T_L arasında çekilir veya verilir. Bu bölge için faz değişim ısısı dikkate alınarak ortalama özgül ısı hesaplanabilir.

$$c' = \frac{L}{T_L - T_s} \quad (5.20)$$

Faz değişim problemlerinde faz değişim ısısı, temel olarak iki yaklaşımla dikkate alınır. Bunlar eşdeğer özgül ısı metodu ve entalpi metodudur.[12,13,14,15] Eşdeğer özgül ısı metodunda, doğru sonuçlar elde edebilmek için hareketli erime sınırını dikkate alınarak zaman adımı seçilmelidir. Eşdeğer özgül ısı metodunda, faz değişimi etkisini dikkate alan özgül ısı değişimi göz önüne alınarak zamana bağlı ısı iletimi problemi olarak çözülür. Faz değişimi sıcaklık aralığında, yoğunluk ve faz değişimi hesaba katılarak eşdeğer ısı kapasitesi tanımlanır. Bu durumda ısı transferi denklemini aşağıdaki şekilde yazılır.

$$C \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(k \nabla T) \quad (5.21)$$

Burada T sıcaklık, t zaman, k ısı iletim katsayısı, $C = \rho c$ birim hacim için eşdeğer ısı kapasitesi, ρ yoğunluk ve c özgül ısı'dır. Burada c 'nin özellikle faz değişim bölgesindeki değişimi oldukça iyi bir şekilde belirlenmelidir.

Faz değişim problemlerinin çözümünde yaygın bir şekilde kullanılan diğer bir yöntem entalpi metodudur.[14] Entalpi metodunda özellikle faz değişim bölgesindeki özgül ısı c'nin değişimi yerine faz değişim ısısının ve faz değişim sıcaklık aralığının bilinmesi yeterli olmaktadır. Çoğu zaman c'nin faz değişimi bölgesindeki değişimi hassas olarak bilinmemesine rağmen faz değişim ısısı bilinmektedir. Entalpi metodunda explicit zaman adımına sahip sıcaklık entalpi ifadelerine sahip formülizasyonu ile nümerik çözüme oldukça uygundur. Enerji denklemi aşağıdaki şekilde ifade edilebilir.[14,15,16,17]

$$\frac{\partial H}{\partial t} = \nabla(k \nabla T) \quad (5.22)$$

Burada $H=H(T)=\rho c T$ birim hacim için entalpi, T sıcaklık, k ısı iletim katsayısı, ρ yoğunluk ve c özgül ısı'dır. (5.22) ifadesi A yüzeyine sahip V kontrol hacmi için enerji denklemi yazılarak elde edilebilir.[43]

Herhangi bir V kontrol hacmi için sahip olunan enerji artışı, iç enerji üretimi ve dışarıdan bir iş uygulanmadığı durumda, A yüzeyinden V hacmine iletilen net ısı miktarına eşittir.

$$\frac{d}{dt} \int_V \rho u dV = \int_A k \text{grad} T \cdot \hat{n} dA \quad (5.23)$$

Bu ifade $h=u+pv$ entalpi tanımından $\rho u=\rho h-p$ elde edilerek ayrıca basınç p'nin zamandan bağımsız olması sebebiyle, $\frac{d}{dt} \int_V p dV = 0$ dikkate alınarak (5.23) denklemi aşağıdaki entalpi denklemine dönüşür.

$$\frac{d}{dt} \int_V \rho h dV = \int_A k \text{grad} T \cdot \hat{n} dA \quad (5.24)$$

Faz değişiminde T ile h'nın değişimi (5.24) denkleminde birbirine bağlı olarak kullanılır. Bu durumun geçerliliğini göstermek için A yüzeyine sahip V kontrol

hacmini ele alalım. Burada ρh ve $(k \text{ grad } T)$ süreklidir. Bu durumda (5.24) denkleminin sağ tarafına diverjans teoremini uygulandığında,

$$\int_V \frac{\partial}{\partial t}(\rho h) dV = \int_V \text{div}(k \text{ grad } T) dV \quad (5.25)$$

elde edilir. Ayrıca V 'nin zamandan bağımsız ve (5.25) denkleminin sürekli olduğu göz önünde bulundurularak ,

$$\int_V \left[\frac{\partial}{\partial t}(\rho h) - \text{div}(k \text{ grad } T) \right] dV = 0 \quad (5.26)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho h) - \text{div}(k \text{ grad } T) = 0 \quad (5.27)$$

elde edilir. $dh = c dT$ ifadesi yerine konulduğunda,

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \text{div}(k \cdot \text{grad } T) \quad (5.28)$$

genel ısı transferi ifadesi elde edilir. (5.25) denkleminde $H = \rho h$ volümetrik entalpi tanımını yapılsa ,

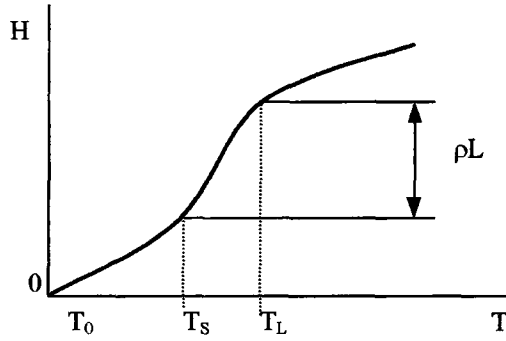
$$\frac{\partial H}{\partial t} = \text{div}(k \text{ grad } T) = 0 \quad (5.29)$$

entalpi denklemi elde edilmiş olur. Böylece (5.28) ve (5.29) denklemlerinin eşdeğer oldukları görülür.

Polietilen boruların elektrofüzyon yöntemiyle birleştirilmesi sürecinde ısı transferi için aşağıdaki entalpi denklemi geçerli hale gelmektedir.

$$\frac{\partial H}{\partial t} = k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) + \dot{q} \quad (5.30)$$

T_s ve T_L sıcaklık aralığında L faz değişim ısısına sahip polietilen için birim hacim volumetrik entalpi değişimi aşağıdaki şekilde gösterilmektedir.



Şekil 5.4. Volümetrik Entalpinin Sıcaklıkla Değişimi

T_s ve T_L faz değişimi sıcaklık aralığında tamamen katılaşma ve tamamen erimiş hale geçme sıcaklıklarıdır. Bu sıcaklık aralığında gerekli olan faz değişim ısı L yoğunluk ρ ile çarpılarak birim hacim için gerekli faz değişim ısına dönüştürülmektedir.

Polietilen malzemenin yoğunluk ve özgül ısının sıcaklıkla değişimi faz değişim bölgesi dışında ihmal edilebilecek ve katı halde iken ρ_s ve c_s tamamen erimiş halde iken ρ_L ve c_L ve sabit alınabilecek durumdadır. T_s ve T_L faz değişimi sıcaklıklarını dikkate alarak birim hacim için volumetrik entalpi başlangıç sıcaklığı T_0 için sıfır alınarak aşağıdaki şekilde hesaplanabilir.

$$H = \rho_s c_s \cdot (T - T_0) \quad T \leq T_s \quad (5.31)$$

$$H = \rho_s c_s \cdot (T_s - T_0) + \rho L \cdot \left(\frac{T - T_s}{T_L - T_s} \right) \quad T_s < T \leq T_L \quad (5.32)$$

$$H = \rho_s c_s \cdot (T_s - T_0) + \rho L + \rho_L \cdot c_L \cdot (T - T_L) \quad T > T_L \quad (5.33)$$

Entalpi metodunda (5.30) denklemi, (5.31),(5.32) ve (5.33) denklemleri birlikte kullanılarak T_s ve T_L faz değişimi sıcaklık aralığında faz değişim ısısı L 'nin bilinmesi halinde çözüm kolaylıkla yapılabilmektedir.

Polietilen boruların elektrofüzyon kaynağı ısı analizinde hem (5.1) deki genel ısı transferi denklemi özgül ısı c 'nin değişimi dikkate alınarak hem de (5.30)'daki entalpi denklemi uygulanarak çözümler yapıldı.

5.4 Başlangıç ve Sınır Koşulları :

Zamana bağlı ısı transferi ısı transferi problemlerinin çözümü için başlangıç ve sınır şartlarının tanımlanması gerekmektedir. Başlangıç şartı, yapının her tarafındaki sıcaklık dağılımını gösterir. Sıcaklık zaman ve koordinata bağlı olarak $T(r,z,t)$ şeklinde ifade edilir.[41] Başlangıç şartı yapının tüm noktaları için geçerlidir.

$$\lim_{t \rightarrow 0} T(r, z, t) = T_0(r, z) \quad (5.34)$$

Problemimizde başlangıç şartı, bütün noktalardaki sıcaklık ortam sıcaklığına eşittir.

Sınır koşulları olarak, problemimizde iki tip sınır şartı var. Birincisi ısıtıcı tel ile polietilen boru ve manşon arasındaki ısı transferi, ikincisi ise dış yüzeylerden çevreye olan taşınım ile ısı transferidir. Tel ve polietilen tam temas sahipse, temas noktalarındaki sıcaklıklar aynıdır. Isıtıcı telden polietilene doğru çıkan ısı akısı, diğer yapıya giren ısı akısına eşittir. Bu durum herhangi bir C temas noktası için aşağıdaki şekilde ifade edilebilir.

$$T_1(C, t) = T_2(C, t) \quad (5.35)$$

$$k_1 \frac{\partial T_1(C, t)}{\partial n} = k_2 \frac{\partial T_2(C, t)}{\partial n} \quad (5.36)$$

burada n , C noktasında yüzeye dik olan normaldir.

İki ayrı yapı iyi bir ısıl temasa sahip değilse, ısı akıları için yukarıda bahsedilen durum geçerli olmasına rağmen, iki yüzeydeki sıcaklıklar ısı akısına bağlı olarak farklı olacaktır. Bu durumda ısıl temas direnci veya tersi ısıl temas iletim katsayısı kavramları tanımlanmalıdır.[44] Bu durum aşağıdaki şekilde ifade edilebilir.

$$k_1 \frac{\partial T_1(C, t)}{\partial n_1} = h' [T_2(C, t) - T_1(C, t)] \quad (5.37)$$

$$k_1 \frac{\partial T_1(C, t)}{\partial n_1} = k_2 \frac{\partial T_2(C, t)}{\partial n_1} \quad (5.38)$$

h' : ısıl temas iletim katsayısı

Diğer bir sınır şartı ise, polietilen manşon dış yüzeyi ve boru iç yüzeylerinden taşınım ile çevreye olan ısı transferidir. Yüzeyden çevreye olan ısı transferi aşağıdaki şekilde ifade edilebilir.

$$k \frac{\partial T}{\partial n} = h [T - T_0] \quad (5.39)$$

h : ısı taşınım katsayısı

T_0 : çevre sıcaklığı

6. SAYISAL ÇÖZÜM :

6.1 Sayısal Çözüm için Problemin Tanımı :

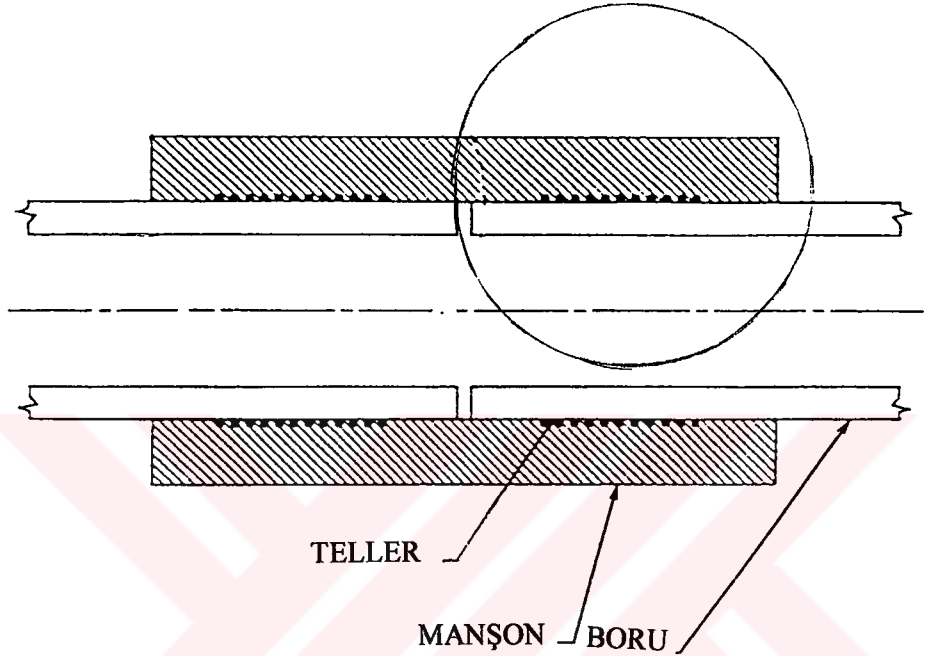
Kurulan matematik model ve teorik analiz, iki boyutlu ısı transferi üzerine, sıcaklıkla değişen ısı iletim katsayısı, yoğunluk, faz değişimi ve bu faz değişimi özgül entalpi tanımı yaparak çözümde kullanılmasını ve elektrik etkisiyle tellerde ısı üretimini içermektedir.

Elektrofüzyon kaynak işleminde, tek enerji kaynağı olan tel sarımının direnci sıcaklıkla değişmektedir. Bu sebeple ısı üretimi de tel sıcaklığına bağlı olarak değişmektedir. Kurulan modelde ve yapılan sayısal analizde bu durum dikkate alındı. Ayrıca tel sarımları gerçekte sürekli bir sarım olarak helezonik şekle sahiptir. Fakat sayısal analizde dikkate alınan geometrik modelde tekil dairesel sarımlar olarak kullanılmaktadır. Aslında tel birbirine bağlı olmasına rağmen analizlerde bu durum göz ardı edilebilmektedir. Bu durumu gerçek duruma yakınlaştırmak için komşu teller arasında bir ısı iletimi bağı kuruldu. Sayısal çözümde faz değişimi hem özgül ısının sıcaklıkla değişimi tanımlanarak hem de faz değişim ısını dikkate alarak entalpi metoduyla sonlu farklar metodu kullanılarak çözüldü. Ayrıca yaygın olarak kullanılmaya başlanılan mühendislik paket programlarından ANSYS programı ile de çözümler yapıldı.

6.2 Elektrofüzyon Manşon Boru Kaynağı Geometrik Modeli :

Elektrofüzyon manşon ile polietilen boru montajı Şekil 6.1'de görülmektedir. Burada görüldüğü gibi çevresel olarak ve her iki boru bağlantısı itibarıyla simetriktir. Bu simetrik durumda dolayı teorik çözüm çember içerisine alınan kısım için yapıldı.

Sayısal çözümde kullanılan ANSYS programı ile sonlu elemanlar yönteminde çözüm için tel yerleşimi sarım sayısına, geometri ise girilen boru ve manşon boyutları göz önünde tutularak modüler hale getirildi. Oluşturulan modelde boru ile manşonun sıkı bir şekilde geçtiği ve tam temas halinde olduğu kabulü yapıldı.



Şekil 6.1 Elektrofüzyon manşon ve polietilen boru montajı

6.3 Genel Enerji Denkleminde Göre Sayısal Çözüm :

Kurulan modelde verilen yükler, tüm model için başlangıç sıcaklığı T_0 , Manşon dış yüzeyinden ve boru iç yüzeyinden çevreye taşınım ile ısı geçişi ve tellerde elektrik enerjisi sebebiyle oluşan ısı üretimidir. Ayrıca polietilen faz değişimi problemde önemli bir yer tutmaktadır. Faz değişim problemlerinde faz değişim ısısı temel olarak iki yaklaşımla dikkate alınır. Bunlar eşdeğer özgül ısı metodu ve entalpi metodudur.[12,13,14,14] Eşdeğer özgül ısı metodunda, özgül ısı sıcaklıkla değişimi iyi bir şekilde tanımlanmalıdır. Bu durumda ,

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) + \dot{q} \quad (6.1)$$

denklemini sonlu farklar yöntemi kullanılarak $\Delta x = \Delta y$ alınarak iç nodlar için explicit olarak

$$T_{m,n}^{p+1} = Fo (T_{m+1,n}^p + T_{m-1,n}^p + T_{m,n+1}^p + T_{m,n-1}^p) + (1 - 4.Fo) T_{m,n}^p + \frac{Fo \cdot \dot{q} \cdot (\Delta x)^2}{k} \quad (6.2)$$

şekline dönüşür. Burada Fo Fourier sayısı ve taşınım ile ısı geçişi sınır şartı durumunda geçerli olan Bi Biot sayısıdır.[26,44,45]

$$Fo = \frac{k \Delta t}{\rho c (\Delta x)^2}, \quad Bi = \frac{h \cdot \Delta x}{k}$$

Isıtıcı teldeki birim hacim için ısı üretimi ise,

$$\dot{q} = \frac{U^2}{R_0 (1 + \alpha_w \Delta T) L_w A_w} \quad (6.3)$$

Burada,

R_0 : ısıtıcı telin başlangıç sıcaklığındaki direnci [ohm],

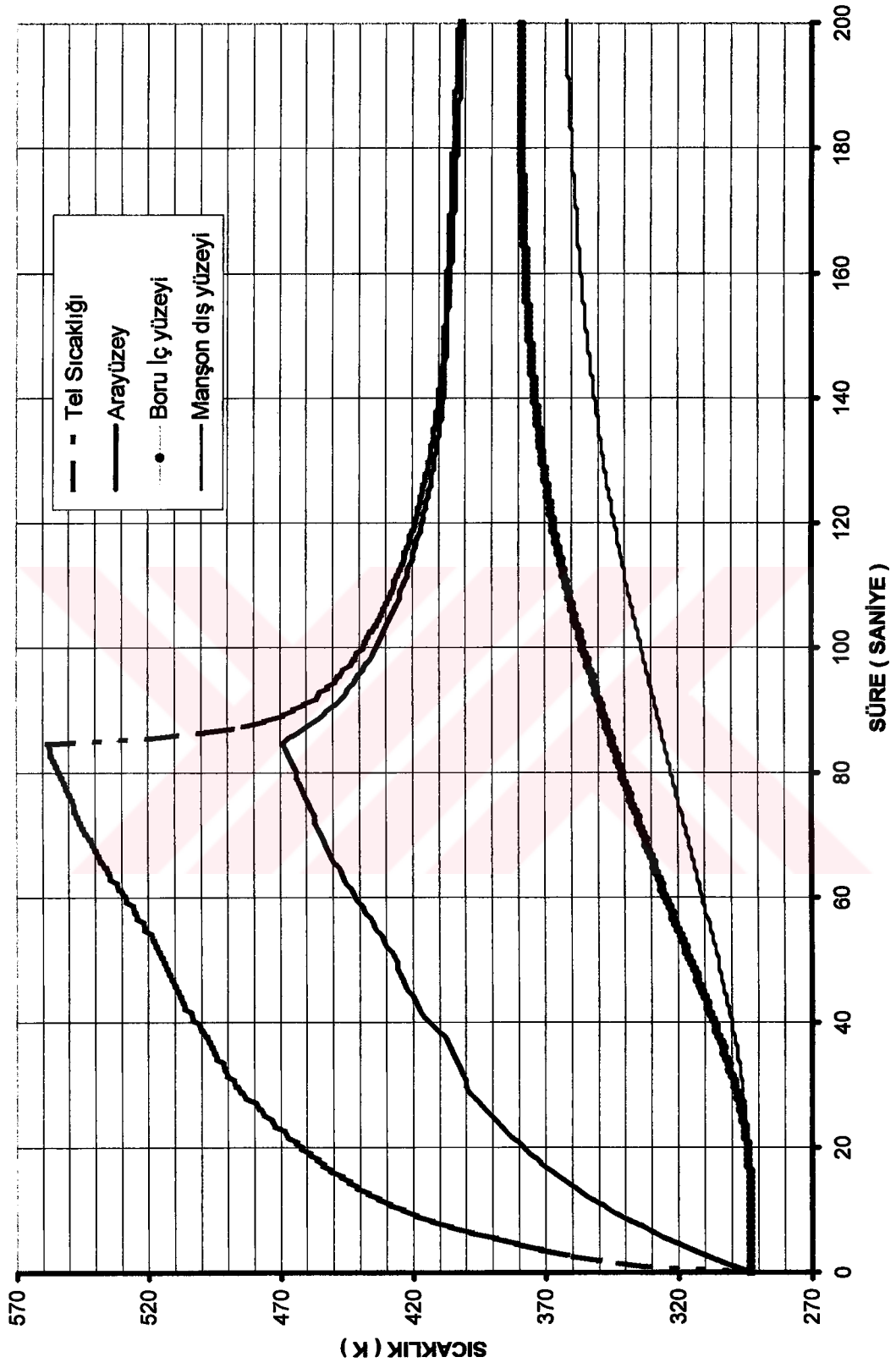
A_w : ısıtıcı tel kesit alanı [m^2],

L_w : ısıtıcı telin boyu [m],

α_w : ısıtıcı tel direncinin sıcaklık katsayısı [$1/^\circ K$].

Problemin sayısal çözümünde, (6.2) sıcaklık eşitliği sınırlar için de ayrıca yazılır. Bu denklemdeki $\dot{q}$ ısı üretimi yalnızca tellerin bulunduğu yerlere isabet eden nodlar için geçerli olup diğer nodlar için $\dot{q} = 0$ alınır.

Genel enerji denklemine göre sayısal çözüm sonuçları çeşitli noktaların sıcaklık değişimleri için şekil 6.2’de verilmiştir.



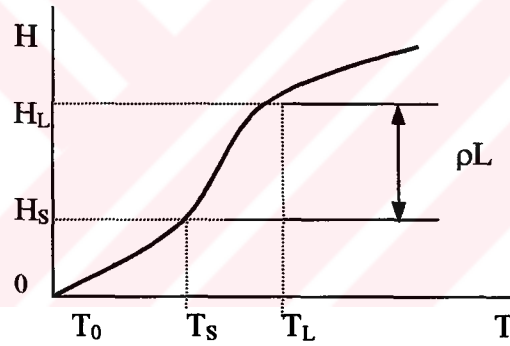
Şekil 6.2 Genel enerji denklemine göre elektrofüzyon kaynağında çeşitli noktaların sıcaklıklarının zamanla değişimi

6.4 Entalpi Yöntemine Göre Sayısal Çözüm :

Faz değişim problemlerinin çözümünde yaygın bir şekilde kullanılan diğer bir yöntem entalpi metodudur.[14,15,16,17] Entalpi metodunda (6.1) denklemi aşağıdaki denkleme eşdeğerdir.

$$\frac{\partial H}{\partial t} = k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) + \dot{q} \quad (6.4)$$

Burada T_0 başlangıç sıcaklığındaki birim hacim için volumetrik entalpi $H=0$ alınarak $H=\rho c \Delta T$ olarak tanımlanır. Entalpi metodunda faz değişim bölgesi için faz değişim ısı L [J/kg] 'nin bilinmesi yeterli olmaktadır. Birim hacim için entalpi değişimi şekil 6.3'te gösterilen grafikte görülmektedir.



Şekil 6.3. Birim hacim için entalpinin sıcaklıkla değişimi

Polietilen malzemenin yoğunluk ve özgül ısısının sıcaklıkla değişimi faz değişim bölgesi dışında ihmal edilebilecek ve katı halde iken ρ_s ve c_s tamamen erimiş halde iken ρ_L ve c_L ve sabit alınabilecek durumdadır. T_s ve T_L faz değişimi sıcaklıklarını dikkate alarak birim hacim için volumetrik entalpi başlangıç sıcaklığı T_0 için sıfır alınarak aşağıdaki şekilde hesaplanabilir.

$$H = \rho_s c_s (T - T_0) \quad T \leq T_s \quad (6.5)$$

$$H = \rho_s c_s \cdot (T_s - T_0) + \rho L \cdot \left(\frac{T - T_s}{T_L - T_s} \right) \quad T_s < T \leq T_L \quad (6.6)$$

$$H = \rho_s c_s \cdot (T_s - T_0) + \rho L + \rho_L \cdot c_L \cdot (T - T_L) \quad T > T_L \quad (6.7)$$

(6.4) denklemi sonlu farklar yöntemi kullanılarak $\Delta x = \Delta y$ alınarak iç nodlar için explicit olarak,

$$H_{m,n}^{p+1} - H_{m,n}^p = (T_{m+1,n} + T_{m-1,n} + T_{m,n+1} + T_{m,n-1} - 4T_{m,n}) \cdot Fo' + \frac{Fo' \cdot \dot{q} \cdot (\Delta x)^2}{k} \quad (6.8)$$

ifade edilir. Burada $F'o = \frac{k \cdot \Delta t}{(\Delta x)^2}$ olarak tanımlanır.

Başlangıç sıcaklığı T_0 'da volumetrik entalpi $H_{m,n}^p = 0$ alınır ve sıcaklığa bağlı olarak $H_{m,n}^{p+1}$ hesaplanır. İkinci ve daha sonraki adımlarda ihtiyaç duyulan $T_{m,n}^p$ sıcaklıkları aşağıdaki şekilde hesaplanarak (6.8) eşitliğinde yerlerine konulur. H_s ve H_L sabit olmak üzere ,

$$H_s = \rho_s c_s \cdot (T - T_0) \quad (6.9)$$

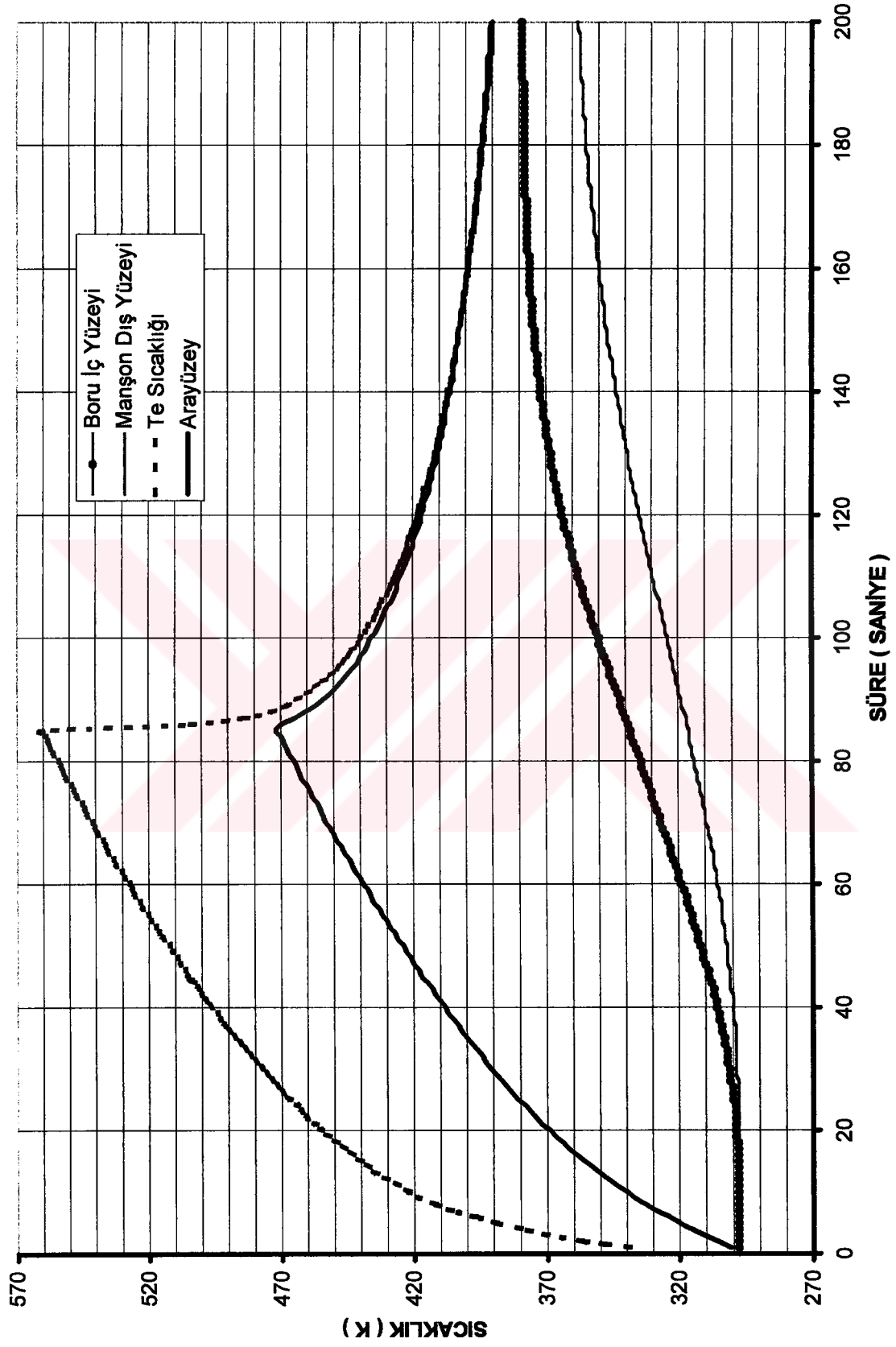
$$H_L = \rho_s c_s \cdot (T - T_0) + \rho L \quad (6.10)$$

$$T^p = \frac{H^p}{\rho_s c_s} + T_0 \quad H^p \leq H_s \quad (6.11)$$

$$T^p = (T_L - T_s) \frac{H^p - H_s}{\rho L} + T_s \quad H_s < H^p \leq H_L \quad (6.12)$$

$$T^p = \frac{H^p - H_L}{\rho_L c_L} + T_L \quad H^p > H_L \quad (6.13)$$

Entalpi metoduna göre sayısal çözüm sonuçları çeşitli noktaların sıcaklık değişimleri için şekil 6.4'te verilmiştir.



Şekil 6.4 Entalpi metoduna göre elektrofüzyon kaynağında çeşitli noktaların sıcaklıklarının zamanla değişimi

Sonlu farklar yöntemi kullanılarak yapılan çözümlerde ısı iletim katsayısı k , tellerin bulunduğu nodlara isabet ettiği durumda, temasta bulunan iki yüzey ısı iletim katsayıları arasında büyük bir fark olması durumunda aritmetik ortalama yerine harmonik ortalamanın daha iyi sonuç vermesi sebebiyle

$$k = \frac{2k_w k_p}{k_w + k_p} \quad (6.14)$$

olarak hesaplandı.[46,47] Diğer polietilen yapı içerisindeki nodlar için $k=k_p$ 'dir. Burada k_w ısıtıcı tel ısı iletim katsayısı k_p ise teli çevreleyen polietilenin ısı iletim katsayısıdır.

6.5 ANSYS Programı İle Sayısal Çözüm :

Sonlu farklar yöntemini kullanılarak yapılan sayısal çözümle birlikte ANSYS paket programı kullanılarak da çözümler yapıldı.

Tellerdeki birim hacim ısı üretimi değişen tel direncine bağlı olarak aşağıdaki şekilde dikkate alındı.

```
**GET,TT,NODE,NODE(DX,WOR,0),TEMP
DELTA=TT-TO
ALPHA=7E-4
R_W=R_O+ALPHA*DELTA
VOL=[(3,1416*WD**2)/4*LW]
HG=[(V**2)/(R_W*VOL)]
```

TT tel sıcaklığı , ALPHA tel direncinin sıcaklıkla değişim katsayısı olmak üzere hesaplanarak ANSYS paket programında BFE,,HGEN,,, komutu ile tellere ısı üretim yükü uygulandı. Elektrofüzyon kaynak işlemi ısıtma ve soğuma periyodu olmak üzere iki bölümden oluşmaktadır. Uygulanan ısı üretimi ısıtma periyodu süresince uygulanmakta ve bu enerji kesilmesi ile sıfıra inmektedir. Bu durum çevrim içerisinde

*DO, TM, T_INT, T_END, T_INC

.....

.....

*IF, TM, GE, TW, THEN

HG=0

*ENDIF

SAVE

*ENDDO

şeklinde ifade edilmektedir. Enerji kesildiği anda tel sıcaklığı hızlı bir şekilde düşmektedir.

6.6 Teller Arası Isı İletimi :

Tel sarımları gerçekte sürekli bir sarım olarak helezonik şekle sahiptir. Fakat analizde tekil dairesel sarımlar olarak kullanılmaktadır. Aslında tel birbirine bağlı olmasına rağmen analizlerde bu durum göz ardı edilebilmektedir. Bu durumu gerçek duruma yakınlılaştırmak için bir ısı iletimi bağı kuruldu.

Kurulan bu iletim bağıının ısı iletim katsayısı ve kesit alanı hesabı, yan yana bulunan iki tel arasındaki ısı akısı, bu iki tel arasında aynı ısı transferini sağlayacak şekilde yapılır.

Bu durum,

$$q_1 \cdot A_1 = q_2 \cdot A_2 \quad (6.15)$$

şeklinde ifade edilebilir. Bir boyutlu ısı iletimi

$$q_i = \frac{k_i(T_1 - T_2)}{d_i} \quad (6.16)$$

İfadesinde

$$K_i = \frac{k_i}{d_i} \quad (6.17)$$

olduğu dikkate alınır,

$$K_2 = \frac{k_2}{d_2} \quad \text{ve} \quad K_1 = \frac{k_1}{d_1} \quad (6.18)$$

(6.18) teki ifadeler (6.15) te yerlerine konulursa,

$$K_2 = \frac{K_1 \cdot A_1}{A_2} \quad (6.19)$$

toplam ısı geçiş katsayısı K_2 ve ısı iletim katsayısı k_2 bulunur.

6.7 Teorik Analizde Kullanılan Parametreler :

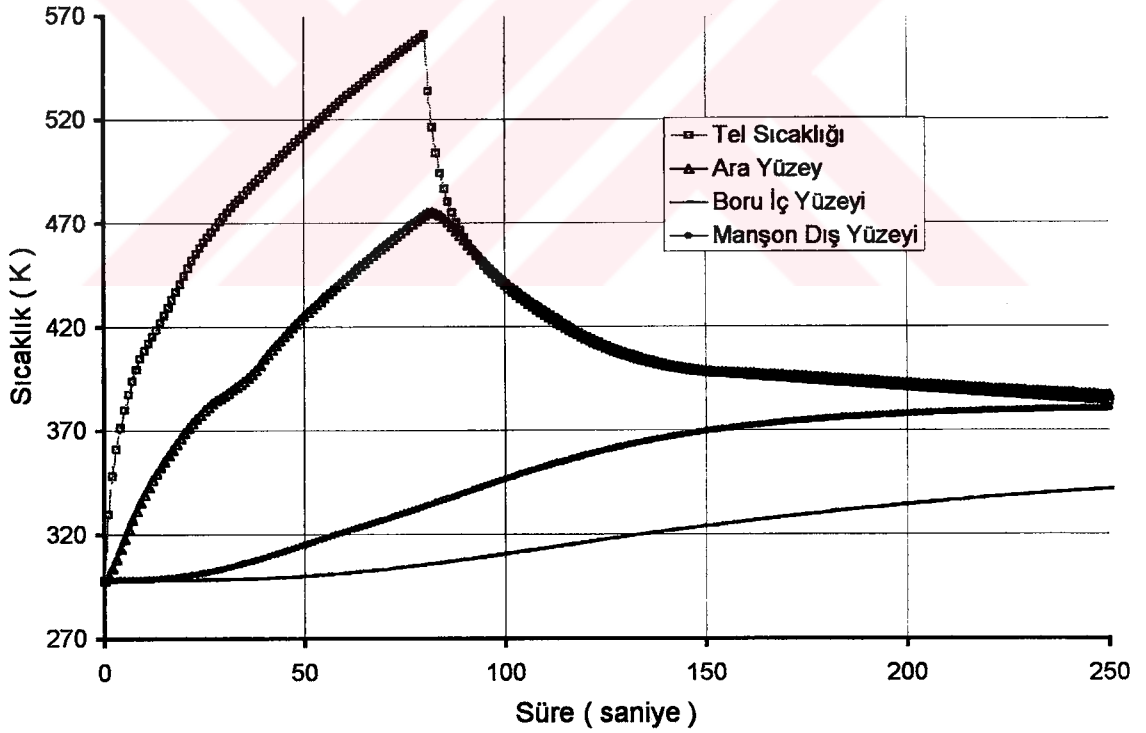
Polietilen manşon ve borunun elektrofüzyon yöntemiyle birleştirilmesi ile ilgili model 63 mm ve 110 mm çapları için çözüldü. 63 mm ve 110 mm nominal çapındaki polietilen boru ile elektrofüzyon manşon için analizde kullanılan parametreler aşağıda verilmiştir.

Çevre sıcaklığı(°K)	: 298	298
Uygulanan gerilim(Volt)	: 38,3	38
Telin başlangıçtaki direnci(ohm)	: 1,99	1
Boru iç yarıçapı(metre)	: 25,7E-3	45E-3
Boru dış yarıçapı(metre)	: 31,5E-3	55E-3
Manşon dış yarıçapı(metre)	: 41,5E-3	68E-3
Tel çapı(metre)	: 0,6E-3	0,76E-3
Bir yanındaki tel sarım sayısı(adet) N	: 12	13
Manşonun yarı boyu(metre)	: 53E-3	82E-3
Enerjinin kesilme zamanı(saniye)	: 81-85	185
İlk telin model eksenine olan mesafesi(metre)	: 9,5E-3	24E-3
Teller arası mesafe(metre)	: 2,82E-3	3,8E-3
Tel direnci sıcaklık katsayısı(1/°K)	: 0,7E-3	1,3E-3

Polietilenin ısı iletim katsayısı, yoğunluk , özgül ısı ve faz değişim ısı değerleri Bölüm 2’de verildi.

6.8 Teorik Analizden Elde Edilen Sonuçlar :

Polietilen manşon ve borunun elektrofüzyon kaynağının ısı analizi sonlu farklar yöntemi kullanılarak bir bilgisayar programı hazırlandı ve bu programla birlikte ANSYS paket programında da çözümü yapıldı. Bu çözümde, tel sıcaklığı, manşon ile boru ara yüzey sıcaklığı, manşon dış yüzey sıcaklığı ve boru iç yüzey sıcaklığı ile süreç boyunca erimiş bölge kalınlığı üzerinde duruldu. Füzyon bölgesi olan tellerin orta noktasına isabet eden noktada tel sıcaklığı, ara yüzey sıcaklığı , manşon dış yüzey ve boru iç yüzey sıcaklığı 63 mm için ANSYS programı ile yapılan çözüm şekil 6.5’te verilmiştir.



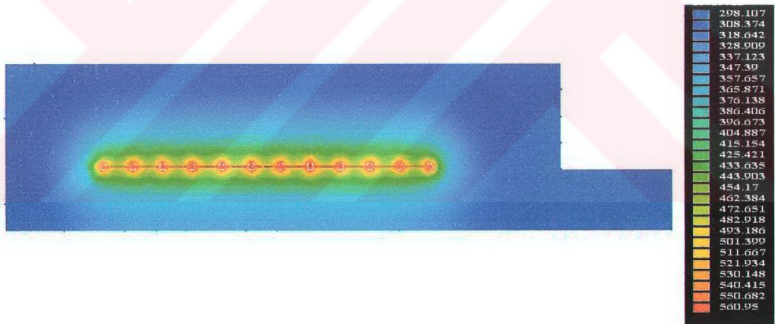
Şekil 6.5 Polietilen Manşon Boru Elektrofüzyon kaynağı sıcaklık zaman grafiği

Enerjinin verildiği başlangıç anından enerjinin kesildiği zamana kadar olan süreç ısıtma periyodudur. Bu andan sonra enerjinin kesilmesiyle birlikte tüm erimiş bölgenin

katılaşması ve mukavim bir yapı elde edilen 110°C (383°K)'ye kadar olan süreç ise soğuma periyodudur.

Enerjinin verilmesi ile birlikte tel sıcaklığı hızlı bir şekilde yükselmektedir. Fakat yükselme, tel etrafındaki polietilen malzemenin erimeye başlaması ve tel direncinin sıcaklıkla artması sebebiyle, hızını azaltmaktadır. Enerji kesildiği anda ise sıcaklığı ani bir şekilde erimiş bölge sıcaklığına düşmektedir.

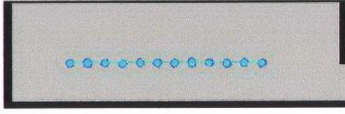
Ara yüzey sıcaklığı ise tele göre düşük ısı iletim katsayısı (0,4 W/mK, 20°C'de) sebebiyle sıcaklık artışı daha yavaş olmaktadır. Özellikle polietilenin erime sıcaklığı 120°C (393°K) civarında erime ısısının çekilmesi sebebiyle sıcaklık artış eğimi azalmakta , erime sonrası tekrar yükselmektedir. Enerji kesilmesi ile sıcaklık düşmeye başlamaktadır. Enerjinin kesildiği anda tel sıcaklığı ve ara yüzey sıcaklığı maksimuma erişmektedir. Şekil 6.6'da enerji kesildiği anda kesitteki sıcaklık dağılımı verilmektedir.



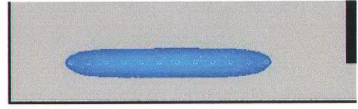
Şekil 6.6 Elektrofüzyon kaynağında enerjinin kesildiği anda kesitteki sıcaklık dağılımı

Manşon dış yüzey sıcaklığı ve boru iç yüzey sıcaklığı ise enerji kesilmesine rağmen polietilenin düşük ısıl iletkenlik katsayısı dolayısıyla artmaya devam etmektedir. Boru iç yüzey sıcaklığı, boru et kalınlığının manşona göre daha az olması ve iç yüzeydeki ısı taşınım katsayısının düşük olması sebebiyle manşon dış yüzey sıcaklığına göre daha yüksektir.

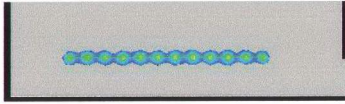
Isınma ve soğuma evreleri için erimiş bölgelerin kalınlıkları çeşitli zaman aralıkları ile Şekil 6.7’de verilmektedir.



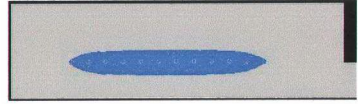
a) $T = 20$ s.



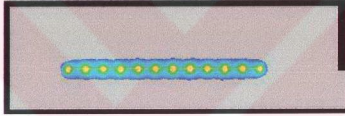
f) $T = 120$ s.



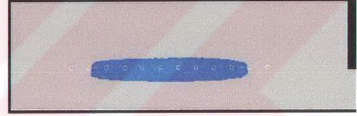
b) $T = 40$ s.



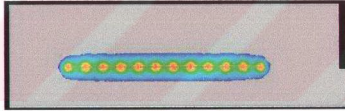
g) $T = 140$ s.



c) $T = 60$ s.



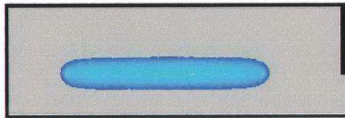
h) $T = 160$ s.



d) $T = 80$ s.



i) $T = 180$ s.



e) $T = 100$ s.

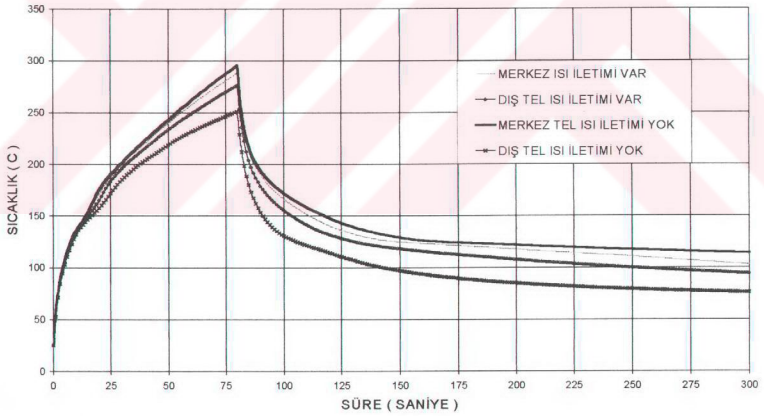


j) $T = 200$ s.

Şekil 6.7 63 mm polietilen boru manşon elektrofüzyon kaynağında eriyen bölgenin gelişimi

Şekil 6.7’de görüldüğü gibi özellikle tel etrafındaki polietilen yavaş yavaş erimekte ve enerji kesildiği 80. saniyede erimiş bölge kalınlığı ve sıcaklığı maksimum değerine ulaşmaktadır. Enerji kesildikten sonra erimiş bölge sıcaklığı ve kalınlığı yavaş yavaş azalmaktadır. Enerji kesildikten sonra 200. saniyede halen tüm erimiş bölgenin katılaşmadığı görülmektedir. Bu durumda bağlantı hareket ettirilmemelidir. Bu sebeple ara yüzey sıcaklığı 383°K(110°C) tam katılaşma değerine kadar olan süre soğuma süresidir. Bu süre tamamlandıktan sonra bağlantı tamamlanmış olmaktadır.

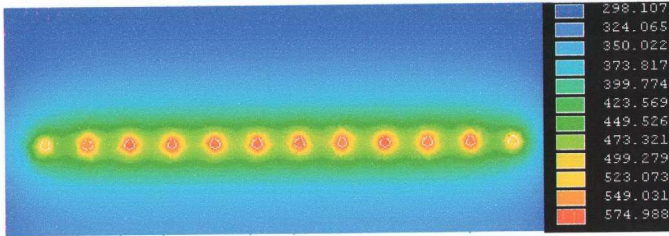
Problemin çözümünde tellerin gerçekte varolan sürekliliğini ve bu şekilde özellikle sıcak olan merkez telden daha düşük sıcaklıkta olan kenar tellere doğru ısı akışı, ısı iletimi sağlanarak daha gerçeğe yakın durum oluşturuldu. 110mm nominal çaplı polietilen boru ile elektrofüzyon manşon kaynağında, ısı iletim bağı mevcut olmadığı durumda merkez tel ile dış tarafta kalan tel sıcaklık değişimleri Şekil 6.8’da görülmektedir.



Şekil 6.8. 63mm Polietilen boru manşon kaynağında teller arası ısı iletiminin tel sıcaklığına etkisi

Grafikte görüldüğü gibi ısı iletim bağı kullanılmadığı zaman merkez tel 568 °K (295°C)’ye çıkmasına rağmen dış tarafta alan tel sıcaklığı 522 °K (249°C) ye

Böylece 46°C'lik bir fark oluşmaktadır. Şekil 6.9'da teller arası ısı iletiminin mevcut olmadığı durumda tel sıcaklıklarının merkezden dışa doğru azaldıkları görülmektedir.



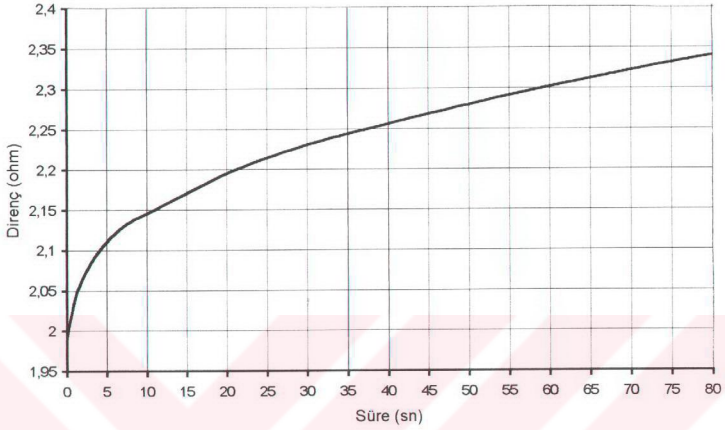
Şekil 6.9 Teller arası ısı iletimi olmaksızın tel sıcaklıklarının durumu

6.9 Isı üretimi için tellere verilen enerji :

Elektrofüzyon kaynak işleminde, Şekil 4.3'te osiloskop görüntüsü verilen kesikli sinüzoidal gerilim veren bir güç kaynağı vasıtasıyla enerji verilir. Maksimum ve minimum tepe noktaları 196 volt okunan 50Hz frekansındaki elektrik gerçeğe , eş değer ısıyı üreten doğru akım gerilim karşılığı 38,2 volt RMS(root mean square) değerine sahiptir. Özellikle değişik dizayn ve çaplara sahip değişik elektrofüzyon bağlantı elemanları için 8-42 volt RMS değerinde gerilimi, tek bir güç kaynağı ile tam sinüzoidal gerilimi keserek sağlamak mümkün olabilmektedir. Hesaplarda kesikli sinüzoidal alternatif akım ve gerilim olmasına rağmen doğru akım karşılığı V_{RMS} değeri alınarak kullanılmaktadır. Sisteme verilen enerji;

$$E = \int_0^{T_p} \frac{V^2}{R} \cdot dt \quad (6.1)$$

formülü ile ifade edilmektedir. Burada tel direnci R sıcaklığına bağlıdır, dolayısıyla zamanla değişmektedir.



Şekil 6.10 63mm Elektrofüzyon kaynağında tel direncin zamanla değişimi

Başlangıçta 1,99 ohm olan direnç, enerjinin kesildiği ve en sıcak noktaya ulaştığı anda 2,34 ohm'a ulaşmaktadır. Sabit gerilim uygulanan sistemde güç de zamanla değişmektedir. Başlangıçta sistemden çekilen güç şekil 6.11'de görüldüğü gibi 737 watt iken enerji kesildiğinde 623 watt seviyesine kadar düşmektedir

Güç ifadesinin

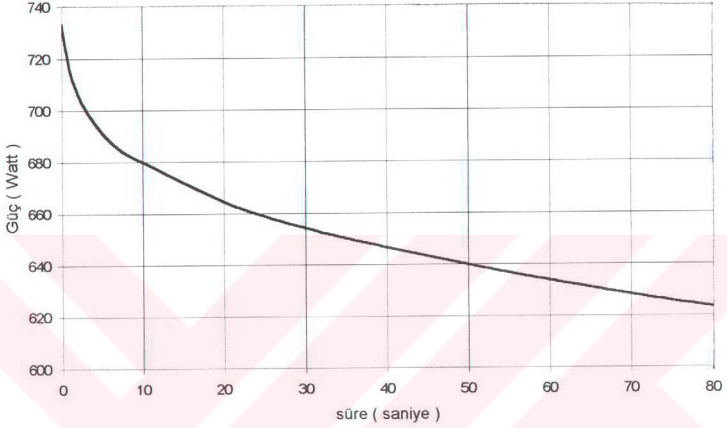
$$P = \frac{V^2}{R} \quad (6.2)$$

olduğu dikkate alındığında enerji ifadesi,

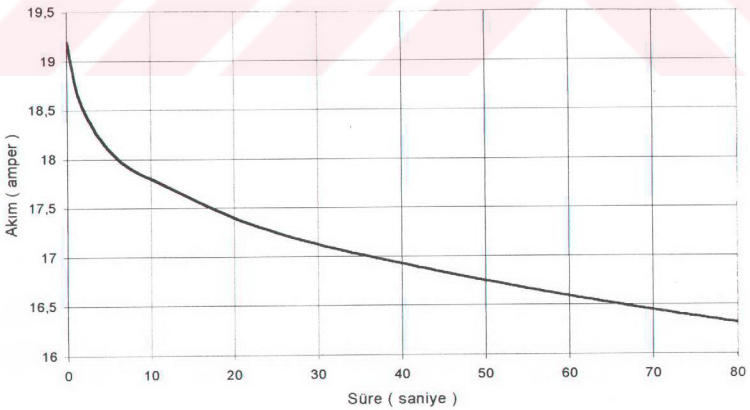
$$E = \int_0^{T_w} P \cdot dt \quad (6.3)$$

şekline dönüşmektedir.

Böylece şekil 6.11'deki güç-zaman grafiğinin altında kalan alan enerjiyi vermektedir. Bu değer 63mm Elektrofüzyon manşon boru kaynağı için 52,8 kJ olarak hesaplanmıştır.



Şekil 6.11 63mm Elektrofüzyon manşon kaynağında çekilen gücün zamanla değişimi



Şekil 6.12 63mm Elektrofüzyon manşon kaynağında çekilen akımın zamanla değişimi

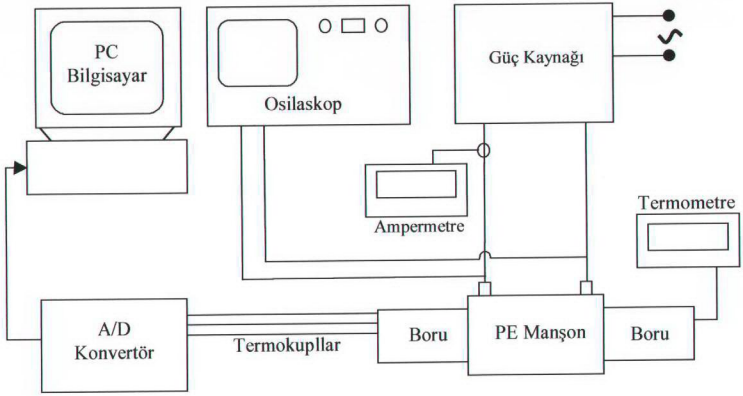
7. DENEYSEL ÇALIŞMA :

7.1 Deney Tesisatı :

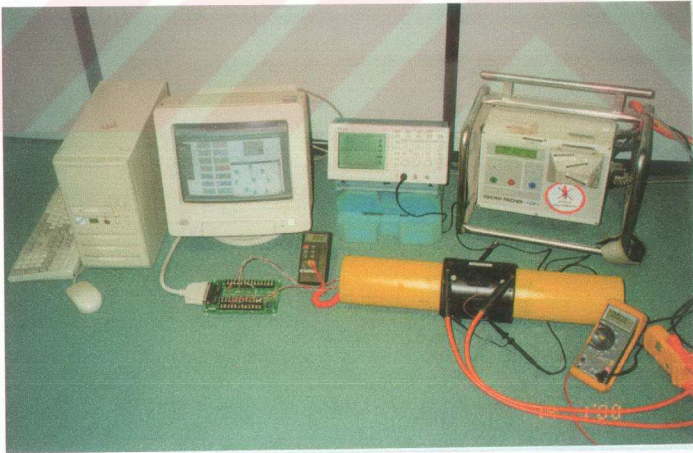
Polietilen boruların elektrofüzyon yöntemiyle kaynak edilmesi, polietilenin erime noktası üzerine kadar ısıtılması ve böylece eriyen kısımların genişlemesi sonucu oluşan basınçla boru ile birlikte erimiş kısımlarda birleşmenin gerçekleşmesine dayanır. Soğuma evresinde, eriyen polietilen boru manşon ara yüzeyinde tekrar katılarak füzyon kaynağı gerçekleşmiş olur. Kaynak işlemi, boru manşon ara yüzeyinde tamamen kapalı bir hacimde olması sebebiyle füzyon olayını ve gelişimini görmek mümkün olamamaktadır. Yapılan deneylerle alınan ölçüm sonuçları ile sıcaklık dağılımlarını ve boru manşon arasındaki erime miktarlarını tespit edilebilmektedir.

Polietilen boruların elektrofüzyon yöntemiyle kaynak oluşumu mekanizmasını iyice tanımak ve çözümü yapılan teorik analiz sonuçlarının geçerliliğini karşılaştırmak amacıyla deneysel çalışma yapıldı. Deneysel ölçümler 63 mm ve 110 mm nominal çaplı polietilen boru ve manşon kaynakları üzerine yapıldı. Polietilen boru manşon kaynağında çeşitli noktalarda ısıtma ve soğuma periyotları dahilinde sıcaklık ölçümleri ve tamamlanmış kaynak bağlantıları kesilerek çeşitli gözlemler yapıldı ve sonuçları yorumlandı.

Kurulan deney tesisatında, ısı üretimini sağlayan tellere elektrik enerjisi veren bir güç kaynağı, uygulanan gerilimi incelemek için bir osilaskop, tel direnci ve akım değerlerini ölçmek için avometre (akım gerilim direnç ölçer), çeşitli noktalarda sıcaklık ölçümü yapmak için termokupl teller, alınacak sıcaklık ölçümlerini dijital hale çevirip bilgisayara aktarmak için A/D konverter kartı ve ölçümleri kaydetmek için PC bilgisayar ile polietilen boru ve elektrofüzyon yer almaktadır. Şekil 7.1 ve Şekil 7.2’de deney tesisatı görülmektedir.



Şekil 7.1 Deney düzeneği blok diyagramı



Şekil 7.2 Deney düzeneğinin genel görünüşü

7.2 Deney Düzenğinde Kullanılan Ekipman ve Ölçme Aletleri :

7.2.1 Güç Kaynağı :

Polietilen boruların elektrofüzyon kaynağında manşon boru ara yüzeyindeki elektrik enerjisi veren güç kaynağı, uygulamada ihtiyaç duyulan 8 – 42 volt r.m.s arasında gerilim verebilen ve bu aralıkta ayarlanabilmekte ve kesikli sinusoidal alternatif sabit gerilim vermektedir. Deneyisel çalışmada İsviçre’de yerleşik George Fisher firmasının ürettiği MSA 3000 modeli güç kaynağı kullanıldı. Bu güç kaynağı ile istenilen sabit gerilim ve enerji süresi ayarlanabilmektedir.

7.2.2 A/D (Analog / Digital) Konverter :

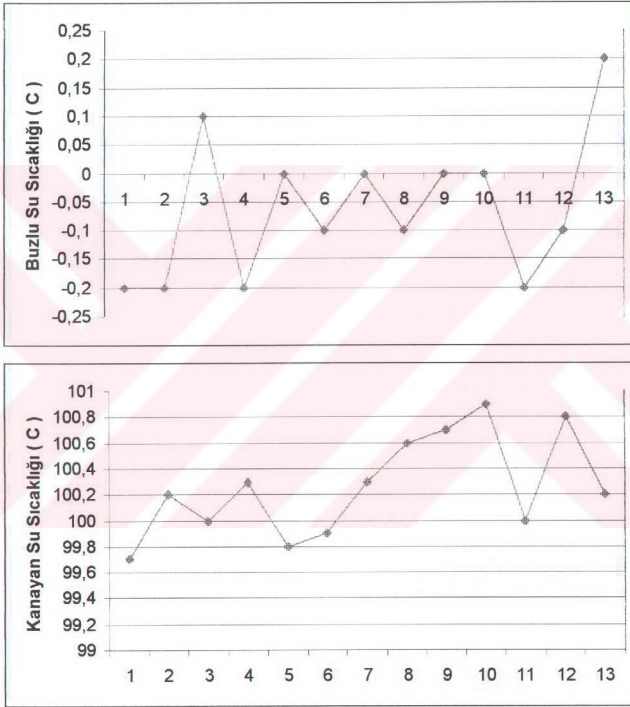
Yerleştirildikleri noktada termokupllar ile sıcaklık değerleri milivolt seviyesinde ölçülmekte ve bir yazılım aracılığıyla konverter kartı ile zamanla değişimi dikkate alarak dijital hale dönüştürülüp bilgisayara aktarılmaktadır. Bu maksatla ADVANTEC firmasının PCL 818 HG A/D konverter kartı kullanıldı. Bu konverter kartına aynı anda 16 adet termokupl bağlamak ve ölçümleri bilgisayara aktarmak mümkün olabilmektedir.

7.2.3 Akım ve Gerilim Ölçümü :

Elektrofüzyon kaynak işleminde ısı üretimi tellere uygulanan elektrik enerjisi ile sağlanmaktadır. Isı üretiminin bilinmesi için uygulanan gerilim ve akımın bilinmesi gerekmektedir. Bu sebeple uygulanan gerilim TETRONIKS marka osilaskop aracılığı ile kesikli sinusoidal şekli ve gerilimin r.m.s (doğru akım eşdeğer gerilim) değeri okundu. Şekil 4.4’te bu osilaskop görüntüsü görülmektedir. Isıtıcı tel tarafından çekilen elektrik akımı 20-30 amper mertebesinde olmasından dolayı ampermetre ile seri olarak ölçülemedi. Bunun yerine manyetik pens aracılığı ile akım ölçüldü. Güç kaynağı ile ısıtıcı tel devresi direnç devresi olması sebebiyle akım ile gerilim arasında faz farkı yoktur. Uygulanan gerilimin sabit olmasına karşılık telin ısınması sebebiyle direnci artmakta ve buna bağlı olarak çekilen akım azalmaktadır. Çekilen akımın değişiminden ısıtıcı telin direnci dolayısıyla sıcaklığı hesaplandı.

7.2.4 Sıcaklık Ölçümü :

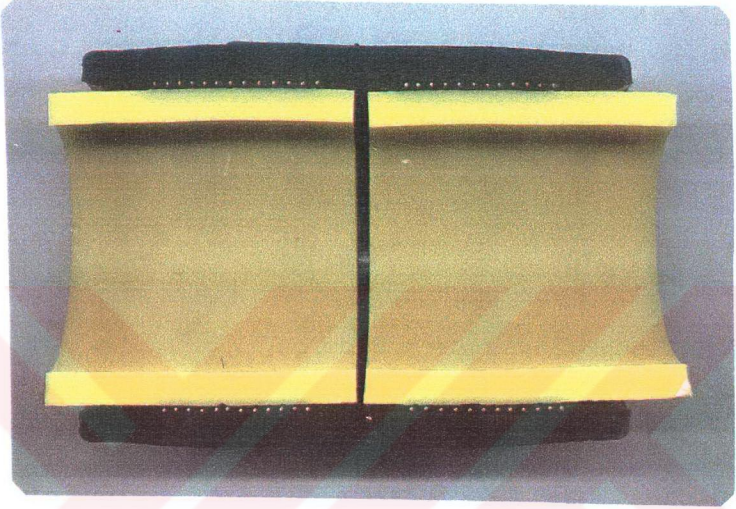
Polietilen boru manşon elektrofüzyon kaynağında boru manşon ara yüzeyinde füzyon bölgesinin her iki uç kısmında ve merkezinde, manşonun dış yüzeyinde ve boru iç yüzeyindeki sıcaklıkları ölçmek için 0,2 mm çapında K tipi termokupllar kullanıldı. Termokuplların kalibrasyonu için buzlu su ve kaynamakta olan su içerisinde şekil 7.3'te görüldüğü gibi hassasiyetleri kontrol edildi.



Şekil 7.3 Termokuplların buzlu su ve kaynayan su sıcaklıkları ile kalibrasyonu

Buzlu su sıcaklığı ölçümünde hedef değer olan 0 °C 'den maksimum 0,2 °C sapma olduğu , kaynayan su sıcaklığında ise hedef değer olan 100,15 °C 'den (765 mmHg basınçta) [48] maksimum 0,75 °C sapma olduğu görüldü.

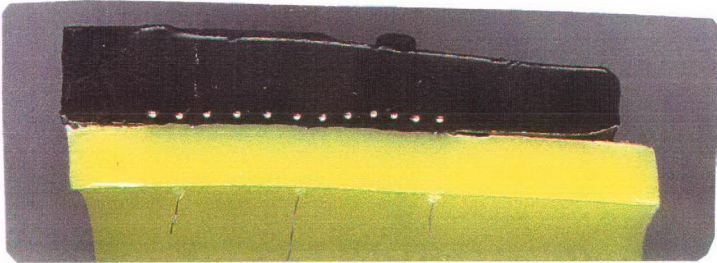
Boru manşon ara yüzündeki termokupllar, boru küçük bir matkap ucu ile iki ayrı delik açılıp teller boru içerisinden her iki tel ayrı delikten geçirilip boru dış yüzeyinde uçları birleştirildi. Dana sonra manşon boruya geçirildi. Böylece ölçüm yapacak termokupl ucu boru manşon ara yüzüne yerleştirilmiş oldu.



Şekil 7.4 Polietilen boru ve elektrofüzyon manşon kaynağı kesiti

7.3 Deneysel ölçümlerden yapılan tespitler:

Polietilen boruların elektrofüzyon yöntemi ile kaynak edilmesinin incelenmesi için değişik çaplarda boru ve manşonlar kaynak edildi, çeşitli ölçümler yapıldı ve kaynak durumunun incelenmesi için kesildi



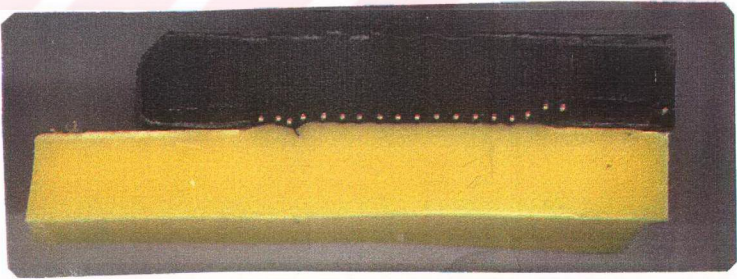
Şekil 7.5 Polietilen boru manşon ara yüzüne termokuplların yerleşimi



Şekil 7.6 Deneysel çalışmada kullanılan polietilen boru ve manşonlar

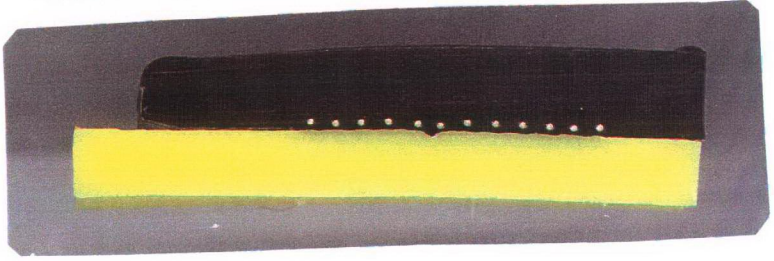
Ara yüzey sıcaklığının değişiminin belirlenmesi amacıyla termokupl ölçüm noktalarının yerlerinin tespiti için elektrofüzyon kaynak işlemi ve ölçümleri tamamlanmış kaynaklı bağlantılardan çeşitli dilimler kesildi. Aşağıdaki hususlar tespit edildi:

1. Termokupllar hareket ederek ara yüzeyden uzaklaşabilmekte bazen ısıtıcı tele temas ederek yanlış ölçümlere sebep olabilmektedir.

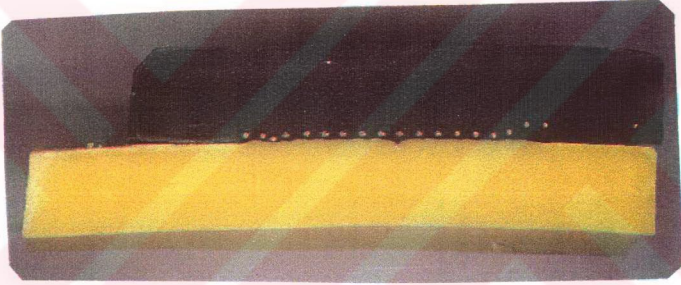


Şekil 7.7 Termokupl ara yüzeyden uzaklaşarak polietilen boru içerisine kayması

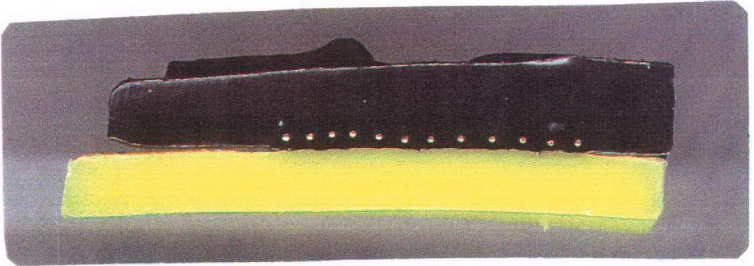
2. Isıtıcı tel ile ara yüzey arasındaki mesafe sabit kalmayıp erimiş ortam içerisinde sınırlı akış ve telin ısınıp uzaması ve soğuyup eski boyuna gelmesiyle küçük değişimler olmuştur.



Şekil 7.8.a) Isıtıcı teller ara yüzeye paralel kalarak yerlerini koruyor.

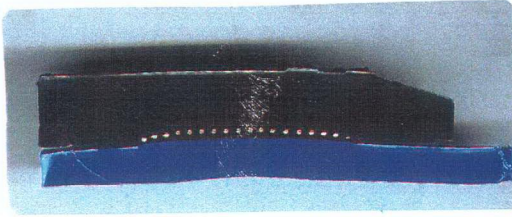


Şekil 7.8.b) Isıtıcı tellerin aksel doğrultuda her iki yana eriyen polietilenle birlikte hareketi.



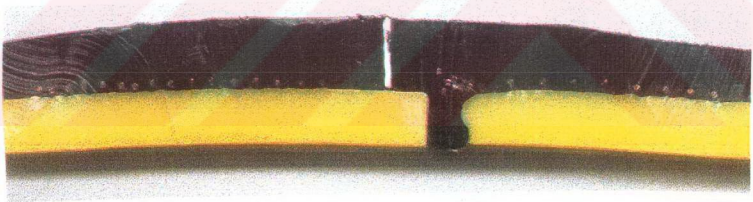
Şekil 7.8.c) Isıtıcı tellerin radyal doğrultuda dışa doğru ara yüzeyden uzaklaşması.

3. Soğuma periyodunda manşona göre daha düşük et kalınlığına sahip boru manşona doğru çekilmekte ve ısıtma bölgesinde boru dış çapına doğru bir çökme olmaktadır.

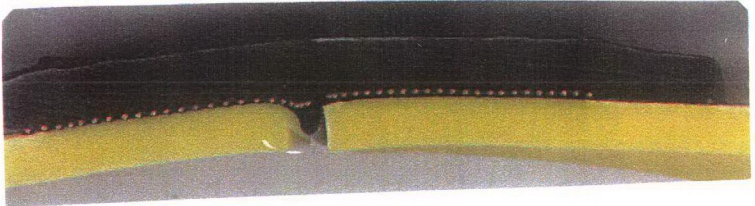


Şekil 7.9 Et kalınlığı düşük (SDR 17,6) polietilen boru ile et kalınlığı fazla (SDR 11) manşon kaynağı sonrası füzyon bölgesinde ince olan borunun dışa doğru çökmesi.

4. Uç tellerinin hemen dış taraflarında soğuk kısımların etkisi ile katılaşma olmakta böylece erimiş kısım burada hapsedilmekte ve genişleme ile basınç oluşmaktadır. Tellerin bulunduğu füzyon bölgesi herhangi bir sebeple erimiş kısım hapsedilemez ise (boru uçlarının füzyon bölgesine rast gelmesi veya her iki yanda soğuk bölge bırakılmaması gibi sebeplerle) erimiş kısım açıklıktan akmaktadır. Bu akışla birlikte teller de hareket ederek birbirlerine temas edebilmektedir.



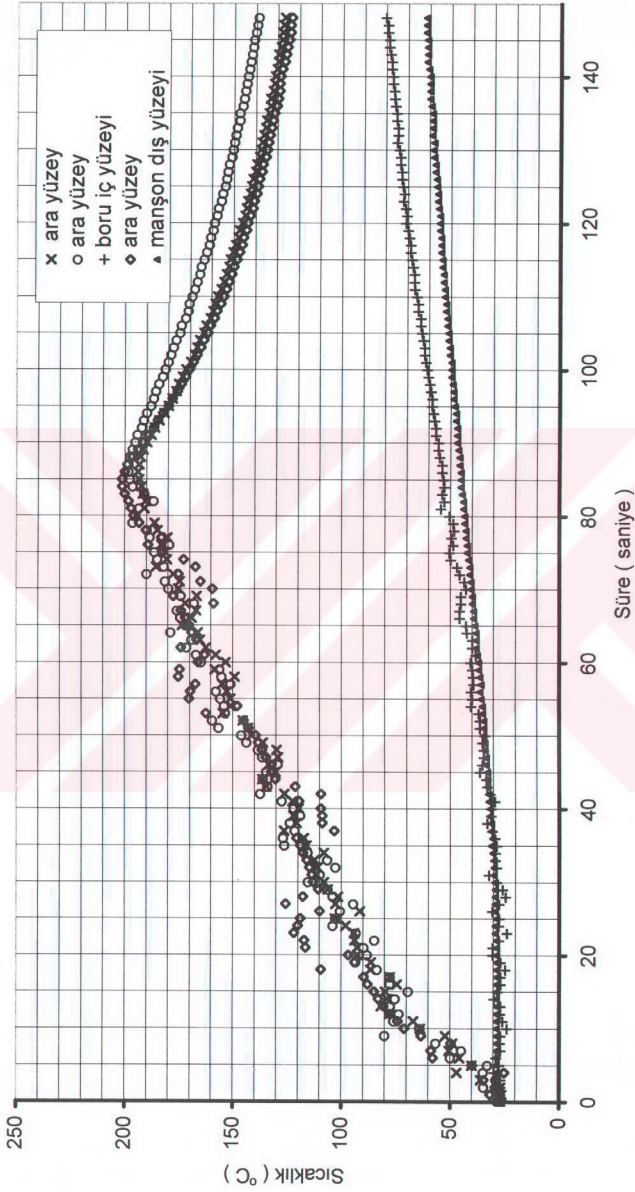
Şekil 7.10.a Boru montajında uçların füzyon bölgesinde kalması.



Şekil 7.10.b Elektrofüzyon manşon orta kısmında tel sarımının devam etmesi sonucu soğuk bölge oluşmaması.

Çeşitli çaplardaki elektrofüzyon kaynak bağlantıları için yapılan deneysel ölçümler incelendiğinde aşağıdaki hususlar tespit edilmiştir.

1. Aynı çaptaki ölçümlerde ara yüzey sıcaklığı termokuplun yerleştirildiği noktaya bağlı olarak 10-20 °C'lik bir aralıkta değişmektedir. Bu farklılığa tel çevresindeki sıcaklık gradyanının çok yüksek olmasına ve montaj boşluğunun da etkisi olmaktadır.
2. Enerji kesilmesi yani ısıtma periyodunun bittiği anda tel, ara yüzey sıcaklığı maksimum değeri alıp buradan itibaren önce hızla daha sonra katılaşma sıcaklığı değerinden sonra soğuma yavaşlamaktadır.
3. Manşon dış yüzey sıcaklığı ve boru iç yüzey sıcaklığı artışı enerji kesilmesine rağmen polietilenin çok düşük ısı iletkenliği sebebiyle bir süre daha artmaktadır.
4. Kaynak işleminin tamamlanması yani tüm erimiş kısımların katılaşması için ara yüzey sıcaklığının 110°C'nin altına inmesi gerekmektedir. Bu katılaşma için gerekli soğuma periyodu ısıtma periyodunun 4-5 katı olabilmektedir.
5. Elektrofüzyon kaynak sırasında ara yüzeydeki erimiş kısımda hacim artışı sebebiyle basınç oluşmaktadır. Özellikle daha düşük et kalınlığına sahip borunun yumuşayıp bu basıncı taşıyamaz duruma gelmesini önlemek için mutlaka enerji kesilmesi sonrası borunun iç yüzeyinde sıcaklık artışının devam ettiği göz önünde bulundurulmalıdır.

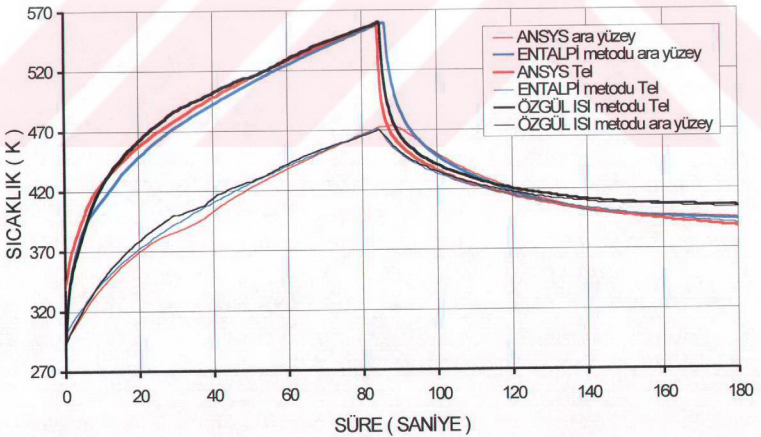


Şekil 7.11 63 mm polietilen boru manşon elektrofüzyon kaynağı sıcaklık ölçümleri

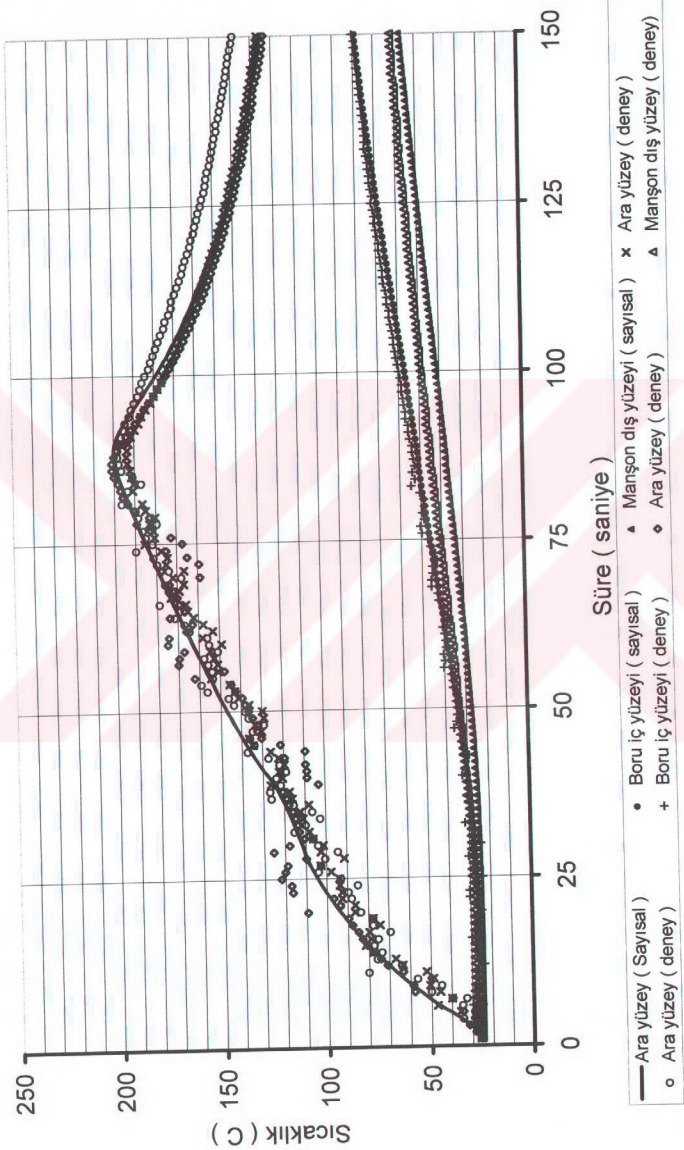
8. SONUÇLAR :

8.1 Teorik ve Deneysel Sonuçların Karşılaştırılması :

Bölüm 6'da polietilen doğalgaz borularının elektrofüzyon kaynağı ısı analizi, üç değişik sayısal programla çözülmüştür. Ayrıca yapılan deney tesisatı ve ölçüm sonuçları bölüm 7'de verilmektedir. Sayısal çözümler ve deneysel ölçümlerin karşılaştırılmasında, elektrofüzyon kaynağının en önemli parametresi olan ısıtıcı tellerin yerleştirildiği boru manşon ara yüzey sıcaklığı, polietilen boru iç yüzey sıcaklığı ve elektrofüzyon manşon dış yüzey sıcaklıkları karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmalar sonucunda özgül ısı değişimini dikkate alan genel enerji denklemi, faz değişim ısını dikkate alan entalpi metodu ve ANSYS paket programı çözümleri kendi aralarında ve deneysel ölçümlerle oldukça iyi bir uyum içerisinde oldukları görülmektedir. Şekil 8.1'de 63mm polietilen kaynağı için sayısal sonuçlar verilmiştir



Şekil 8.1 Sayısal çözümlerin karşılaştırılması



Şekil 8.2 Sayısal çözümlerle deneysel ölçümlerin karşılaştırılması

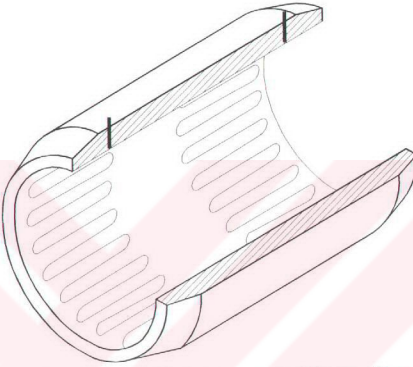
8.2 Sonuçlar ve Tartışma :

Polietilen doğalgaz borularının elektrofüzyon kaynağı ısı analizi, iki boyutlu olarak sıcaklıkla değişen malzeme özellikleri (ısı iletim katsayısı, yoğunluk ve özgül ısı) dikkate alınarak elektrofüzyon kaynak mekanizmasında önemli bir yer tutan erime ve katılaşma olarak gerçekleşen faz değişimi özellikle faz değişim sıcaklık aralığındaki özgül ısı belirlenerek ve çoğu durumda faz değişim sıcaklık aralığında gerekli faz değişim ısısının bilinmesinin yeterli olduğu entalpi metodu kullanılarak sonlu farklar yöntemi kullanılarak modüler iki program geliştirilmiştir. Ayrıca günümüzde yaygın olarak kullanılmaya başlanılan mühendislik paket programı ANSYS için modüler bir yazılım hazırlanmıştır. Sayısal çözümler deneysel ölçümlerle karşılaştırılarak uyum içinde oldukları belirlenmiştir. Komşu teller arasında gerçekte var olan ısı iletimi sayısal çözümlerde tellere isabet eden komşu nodlar arasında ısı iletim bağı kurularak dikkate alındı ve böylece tel sıcaklığı ve erimiş bölgenin geometrisi daha gerçekçi hale getirilmiştir.

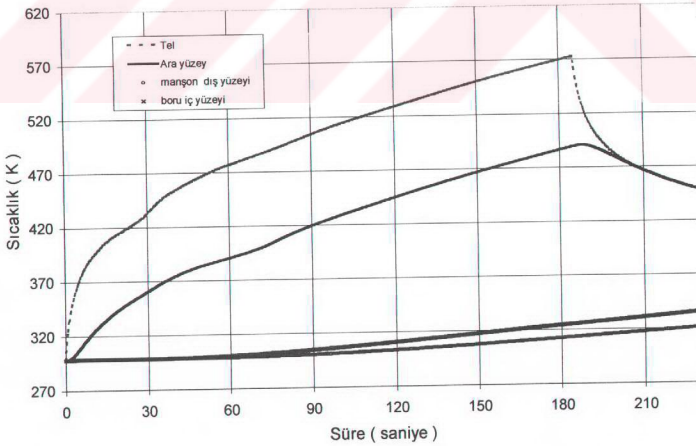
Sayısal sonuçlar ve deneysel incelemeler sonucunda elektrofüzyon kaynağı için tespit edilen hususlar bölüm 6.8 ve bölüm 7.3'te açıklanmıştır. Polietilen malzeme yapısı yaklaşık 350 °C üzerinde bozulması sebebiyle tel sıcaklığı bu değer üzerinde olmamalıdır. Polietilen malzeme yaklaşık 110 °C üzerinde yumuşak hale gelerek deforme olabilmektedir. Özellikle manşona göre daha ince olan polietilen borunun iç yüzey sıcaklığı tele verilen enerji kesilmesine rağmen şekil 8.4'te görüleceği üzere artmaktadır. Bu sebeple boru iç yüzey sıcaklığının 110 °C üzerine çıkmamasına dikkat edilmelidir.

Elektrofüzyon kaynağında ısıtıcı tel sıcaklığı ara yüzey sıcaklığının yaklaşık 100 °C üzerinde yaklaşık 3000 °C civarında olmaktadır. Tel ısındıkça boyu uzadığı için sarım halindeki çap artarak ara yüzeyden uzaklaşmaktadır. Isıtıcı tel olarak bakır kullanıldığında (uzama katsayısı $17,6 \text{ E-6 m/m } ^\circ\text{C}$) 63 mm çapındaki elektrofüzyon kaynağında çap artışı 0,3 mm (toplam tel ilk halde boyu 4,75 m), 110 mm çapında ise çap artışı 0,5 mm (toplam tel ilk boyu 8,98 m) olmaktadır. Bu durumda ısıtıcı teller boru manşon ara yüzeyinden 0,15 mm ve 0,25 mm manşon tarafına doğru uzaklaşmaktadır, bu ise toplam eriyen bölge kalınlığı 4 – 5 mm civarında olduğundan

ihmal edilebilecek düzeydedir. Fakat büyük çaplı boruların elektrofüzyon kaynağında bu durum önemli hale gelmektedir. 1 m çapındaki polietilen borunun elektrofüzyon kaynağı düşünüldüğünde çap artışı en az 5mm civarında olmaktadır. Bu durumda ise ısıtıcı tel ara yüzeyden manşon tarafına doğru uzaklaştığı için manşon tarafı eridiği halde boru kısmı oldukça az eriyecek böylece uygun bir kaynak gerçekleşmemiş olacaktır. Bu durumda spiral tel sarımı uygun olmamaktadır. Özellikle büyük çaplar için aşağıdaki tel sarım şekli çözüm olarak düşünülebilir.

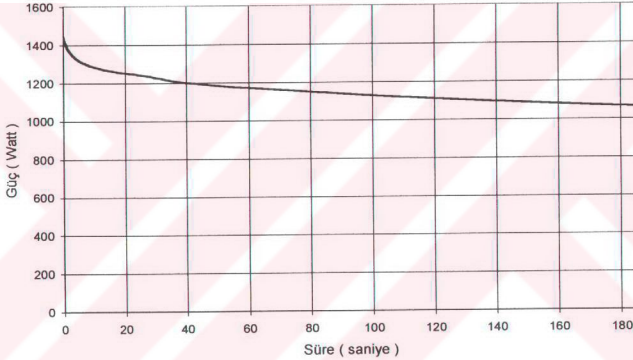


Şekil 8.3 Büyük çaplı elektrofüzyon manşonlar için önerilen ısıtıcı tel sarım şekli



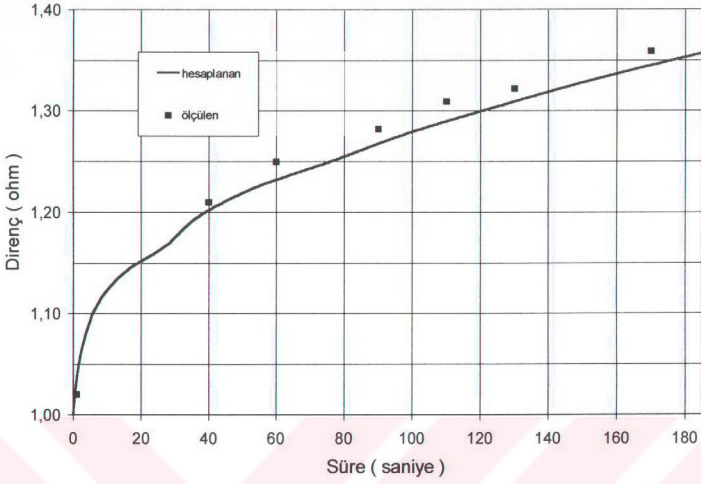
Şekil 8.4. 110 mm çapındaki polietilen boru manşon elektrofüzyon kaynağı sıcaklık değişimleri (ANSYS çözümü)

Polietilen füzyon kaynak mekanizması için gerekli erimiş bölgeyi oluşturan enerji mümkün olduğu kadar kısa sürede verilmelidir. Tel direncinin sıcaklıkla artması sebebiyle ısıtıcı telden verilen enerji zamanla azalmaktadır. 63 mm polietilen elektrofüzyon kaynağında şekil 6.11'de görüldüğü gibi başlangıçta çekilen güç 737 Watt iken enerjinin kesildiği 85. saniyede 623 Watt'a düşmektedir. 110 mm polietilen elektrofüzyon kaynağında şekil 8.5'te görüldüğü gibi başlangıçta çekilen güç 1444 Watt iken enerjinin kesildiği 185. saniyede 1064 Watt'a düşmektedir. Isı üretimini sağlayan ısıtıcı tele sabit güç uygulayabilmek için seçilen ısıtıcı tel direncinin sıcaklık değişim katsayısı küçük olan tercih edilebilir veya sabit elektrik gerilimi yerine güç kaynağı, sabit güç sağlayacak tel direncini artışına karşılık uygulanan gerilimin de artacağı şekilde tasarlanabilir.

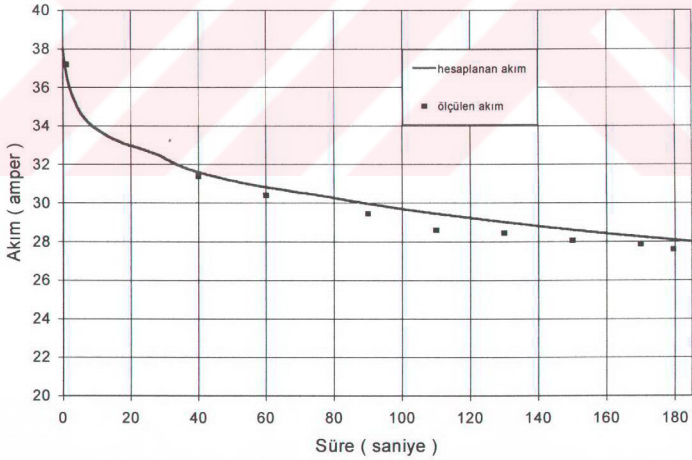


Şekil 8.5. 110 mm polietilen boru elektrofüzyon kaynağında çekilen gücün zamanla değişimi

Elektrofüzyon kaynağında çekilen elektrik akımı 20-40 amper mertebesinde olması sebebiyle seri olarak ölçüm yapılamadı, bunun yerine manyetik pens aracılığı ile çekilen akım ve dolayısı ile direnç değişimi ölçülmüştür. 110 mm polietilen boru elektrofüzyon kaynağı için Şekil 8.6 ve şekil 8.7'de hesaplanan ve ölçülen direnç ve çekilen akımın zamanla değişimi verilmektedir.



Şekil 8.6. 110 mm polietilen boru elektrofüzyon kaynağında ısıtıcı tel direncinin zamanla değişimi



Şekil 8.7. 110 mm polietilen boru elektrofüzyon kaynağında çekilen akımın zamanla değişimi

KAYNAKLAR

- [1] JANSON L. E., 1999. Plastics Pipes for Water Supply and Sewage Disposal, Stockholm.
- [2] GEOERG Fisher, 1995. Distribution Piping Systems, , Switzerland.
- [3] Welding of Large Diameter PE Pipes A Special Challenge, Pipeline and Gas Journal, pp.30-34, December 1996.
- [4] KANNINEN GRIGORY, CHEN, ERGANIOUN, Current Database on Electrofusion Joining of Polyethylene Gas Pipes, Gas Research Institute, Chicago, 1989
- [5] PITMAN G.L, Electrofusion Welding Prediction and Computer Aided Design of Fittings, Proc. 6th. Conference on Plastic Pipes, University of York, 1985.
- [6] SAINT ROYRE, GUEUGNAUT, REVERET, Test Methodology for the Determination of Optimum Fusion Welding Conditions of Polyethylene, Journal of Applied polymer Science. Vol.38, pp.147-162, 1989.
- [7] NUSSBAUM, MEISTER, DUFOUR, Internal Modeling Method for The Design of Electroweldable Polyethylene Parts, Report, Gas de France
- [8] NUSSBAUM, DUFOUR, GUEGNAUT, Electrofusion of Polyethylene Pipes: How and Why. Twelfth plastic Fuel Gas Pipe Symposium, 1991, Proceeding pp.324-330.
- [9] NISHIMURA , INOUE, Fusion Simulation of Electrofusion Joints; 1992 International Gas Research Conference,1992 pp.923-930
- [10] O'DONOGHUE P.E., GREEN S.T.,KANNINEN M.F., Computational Model Simulating Electrofusion Joining in Polyethylene Gas Pipes, Gas Research Institute, Chicago,1996 GRI-96/131
- [11] ROSALA, DAY, WOOD, A Finite Element Model of The Electrofusion Welding of Thermoplastic Pipes, Proc. Inst. Mech. Eng. Vol. 211 Part E,1997
- [12] NAKASHIBA, NISHIMURA, INOUE, Fusion Simulation of Electrofusion Polyethylene Joints for Gas Distribution Polymer Engineering and Science, 1983, Vol. 33, No.17, pp.1146-1151

- [13] WROBEL L.C. - BREBBIA C.A. , 1991, Computational Modeling of Free and Moving Boundary Problems, Vol.2 Heat Transfer, Computational Mechanics Publications Oxford
- [14] WROBEL L. C. , 1990, BREBBIA C. A., NOWAK A. J., Advanced Computational Methods in Heat Transfer, Computational Mechanics Publications
- [15] LEWIS R.W. , 1981, MORGAN K., ZIENKIEWICZ O.C., Numerical Methods in Heat Transfer, John Wiley and Sons Inc.
- [16] MINKOWYCZ W. J., SPARROW E. M., 1997. Advances in Numerical Heat Transfer, Taylor and Francis Publishers,
- [17] CRANK John, 1987. Free and Moving Boundary Problems, Oxford
- [18] Polimer, 1999, PAGEV yayınlari, İstanbul.
- [19] JURAN, R., 1990. Modern Plastics Encyclopedia, McGraw Hill, Vol.67
- [20] Hostalen Technical Bulletin, 1995.
- [21] EN 1555 ,Plastics piping system for supply of gaseous fuels. European Norm1996
- [22] DIN 8074, High density polyethylene pipes.
- [23] ISO 4437 Standart,2000, Burried polyethylene pipes for supply of gaseous fuels.
- [24] STOKES Vijay K., Joining Methods for plastics and plastic Composites: An Overview Polymer Engineering and Science, October 1989, Vol.29 No.19, pp.1310-1324.
- [25] GRIMM R.A, Fusion Welding Techniques for Plastics, Welding Journal Vol.69, 1990.
- [26] HOLMAN J.P., 1992. Heat Transfer, McGraw Hill,
- [27] SUYS Gustaaf, 1990.The Use of Polyethylene In Gas Distribution Systems, Finathene Research S.A., Belgium
- [28] MARK H.F., 1986. Encyclopedia of Polymer Science and Engineering, Vol.6, John Wiley and Sons,
- [29] STOKES V.K., Vibration Welding of Thermoplastics, Polymer Engineering and Science, Vol.28, 1990.
- [30] EWING, L., Electrofusion Joining, Theory and Practice , 1987

- [31] BOWMAN Jeremy, A Review of The Electrofusion Joining Process for polyethylene Pipes Systems, Polymer Engineering and Science, April 1997, Vol. 37, No.4 , pp.674-691.
- [32] GRIGORY S.C., MAGUIRE J. F., DEVINEY M. L., Electrofusion Joining of Polyethylene Gas Pipes: Evaluation of Pipe Preparation, Joining Conditions and Mechanical Performance, GRI-96/0129, 1996.
- [33] USCLAT D., Characteristics of a Good Joint with Electrofusion Fittings, Proc. 6th. Conference on Plastic Pipes, University of York, 1985
- [34] WOOL, YUAN, MCGAREL, Welding of Polymer Interfaces, Polymer Engineering and Science, October 1989, Vol.29 No.19, pp.1340-1367
- [35] BUCZALA , Enhanced Electrofusion Methods, Gas Research Institute, 1992
- [36] ASTM F 1055- 1995, Standard Specification for Electrofusion Type Polyethylene Fittings for Outside Diameter Controlled Polyethylene Pipe and Tubing
- [37] KUHLMAN C.J., CHELL G.G., KANNINEN M. F., DEEL G. W., Lifetime Forecasting of Electrofusion Joining Systems for Polyethylene Gas Pipes, Gas Research Institute, Chicago, GRI-96/0130, 1996.
- [38] ÇENGEL Yunus A. - BOLES Michael A., 1989.Thermodynamics, McGraw Hill
- [39] ECKERT and DRAKE, 1959. Heat and Mass Transfer, , McGraw Hill,
- [40] GÜVEN M.E., MARTI İ.B., COŞKUN İ. ,1982 , Elektroteknik Cilt 1., M.E.B
- [41] ARPACI V. Conduction Heat Transfer, 1966, Addison-Wesley Publishing Co.
- [42] BEJAN, A., Heat Transfer, 1993, John Wiley and Sons Inc.,
- [43] SHAMSUNDAR N., SPARROW E. M., Analysis of Multidimensional Conduction Phase Change Via the Enthalpy Model, ASME Journal of Heat Transfer, 1975.
- [44] BAYAZITOĞLU Y., ÖZİŞİK M. Necati, 1988. Elements of Heat Transfer, McGraw Hill,
- [45] ÖZİŞİK, M. Necati, 1985. Heat Transfer (A Basic Approach), McGraw Hill,
- [46] KREITH F., BOHN M. S. 1993. Principles of Heat Transfer, West Publishing Co.
- [47] POULIKAKOS, D. , 1994. Conduction Heat Transfer, , Prentice Hall,
- [48] ÖZTÜRK, A.-KILIÇ, A., 1982. Termodinamik Özelik Bağlantıları,İ.T.Ü Kütüphanesi,

Tablo A.1 63 mm polietilen boru manşon elektrofüzyon kaynağında teller arası ısı iletiminin merkez ve yan tellere etkisi (sıcaklıklar °C)

saniiye	MTLI	YTLI	MTLZ	YTLZ	saniiye	MTLI	YTLI	MTLZ	YTLZ	saniiye	MTLI	YTLI	MTLZ	YTLZ
0	25	25	25	25	31	202,206	197,941	204,601	187,35	62	260,243	251,26	265,52	233,407
1	57,148	53,765	58,134	52,748	32	204,424	200,14	206,899	189,374	63	261,889	252,69	267,321	234,479
2	75,591	72,743	77,083	71,351	33	206,561	202,206	209,122	191,307	64	263,527	254,119	269,115	235,531
3	88,496	85,995	90,27	84,311	34	208,621	204,154	211,248	193,295	65	265,156	255,545	270,905	236,564
4	98,748	96,526	100,666	94,655	35	210,642	206,046	213,445	195,33	66	266,778	256,969	272,689	237,581
5	107,36	105,339	109,302	103,296	36	212,638	207,899	215,619	197,174	67	268,391	258,393	274,458	238,582
6	114,719	112,809	116,641	110,606	37	214,603	209,731	217,741	198,921	68	269,989	259,812	276,209	239,57
7	121,198	119,322	123,101	116,941	38	216,549	211,544	219,806	200,582	69	271,573	261,223	277,939	240,546
8	126,804	125,124	128,701	122,544	39	218,482	213,343	221,84	202,187	70	273,138	262,618	279,648	241,512
9	131,565	130,301	133,458	127,574	40	220,44	215,159	223,844	203,703	71	274,687	263,998	281,336	242,465
10	135,562	134,678	136,975	132,128	41	222,42	216,982	225,824	205,184	72	276,22	265,372	283,002	243,428
11	139,191	138,113	140,136	136,065	42	224,407	218,797	227,781	206,642	73	277,738	266,738	284,645	244,397
12	142,621	141,1	143,381	138,995	43	226,386	220,598	229,746	208,113	74	279,239	268,093	286,266	245,386
13	145,995	144,032	146,459	141,725	44	228,342	222,42	231,714	209,581	75	280,725	269,44	287,868	246,384
14	149,305	146,732	149,926	144,266	45	230,268	224,261	233,671	211,037	76	282,196	270,78	289,427	247,366
15	152,876	149,367	153,984	146,54	46	232,168	226,093	235,621	212,487	77	283,654	272,116	290,952	248,329
16	156,481	152,067	158,573	148,665	47	234,049	227,855	237,539	213,947	78	285,099	273,453	292,446	249,267
17	160,283	155,078	163,274	150,768	48	235,914	229,577	239,427	215,439	79	286,531	274,791	293,913	250,186
18	164,155	158,237	166,042	153,077	49	237,758	231,263	241,293	216,951	80	287,95	276,123	295,354	251,086
19	167,912	161,475	172,555	155,405	50	239,584	232,916	243,142	218,457	81	289,955	252,94	265,796	228,646
20	171,681	164,994	176,631	157,859	51	241,39	234,545	245,011	219,942	82	242,541	235,554	247,016	211,776
21	175,291	168,785	180,083	160,307	52	243,18	236,161	246,902	221,356	83	240,181	222,306	233,964	198,716
22	178,625	172,778	183,105	162,949	53	244,954	237,758	248,807	222,722	84	220,765	211,978	224,271	188,371
23	181,804	176,585	185,797	165,763	54	246,716	239,334	250,714	224,041	85	213,257	203,726	216,711	179,991
24	184,77	179,967	188,315	168,846	55	248,46	240,889	252,619	225,32	86	207,066	196,978	210,591	173,072
25	187,533	183,001	190,724	171,851	56	250,186	242,421	254,512	226,566	87	201,831	191,351	205,488	167,29
26	190,12	185,878	193,035	174,985	57	251,893	243,932	256,386	227,78	88	197,31	186,562	201,131	162,138
27	192,606	188,551	195,316	177,871	58	253,583	245,425	258,236	228,963	89	193,34	182,411	197,336	157,587
28	195,047	191,087	197,622	180,486	59	255,259	246,9	260,072	230,107	90	189,802	178,772	193,976	153,636
29	197,516	193,478	199,955	182,925	60	256,927	248,363	261,899	231,226	91	186,61	175,532	190,959	150,168
30	199,906	195,704	202,26	185,21	61	258,588	249,817	263,712	232,323	92	183,7	172,61	188,217	147,068

M : Merkez Tel Y: Yan Tel
 LI : teller arası ısı iletimi mevcut LZ : teller arası ısı iletimi yok

Tablo A.1 63 mm polietilen boru manşon elektrofuziyon kaynağında teller arası ısı iletiminin merkez ve yan tellere etkisi (ısıcılıklar °C)

sanife	MTLI	YTLI	MTLZ	YTLZ	sanife	MTLI	YTLI	MTLZ	YTLZ	sanife	MTLI	YTLI	MTLZ	YTLZ
93	181,022	169,947	185,7	144,259	124	137,018	128,972	144,497	111,384	155	124,161	116,814	127,771	95,37
94	178,539	167,516	183,37	141,711	125	136,232	128,318	143,656	110,668	156	124,02	116,572	127,488	95,029
95	176,222	165,233	181,197	139,395	126	135,475	127,676	142,843	109,99	157	123,878	116,337	127,218	94,691
96	174,046	163,047	179,159	137,272	127	134,748	127,05	142,056	108,347	158	123,735	116,107	126,964	94,36
97	171,994	161,015	177,237	135,294	128	134,048	126,457	141,295	108,733	159	123,592	115,864	126,725	94,036
98	170,051	159,114	175,416	133,407	129	133,374	125,887	140,558	108,097	160	123,447	115,628	126,497	93,718
99	168,203	157,306	173,684	131,948	130	132,725	125,331	139,844	107,421	161	123,302	115,399	126,283	93,408
100	166,442	155,589	172,033	130,775	131	132,102	124,828	139,152	106,779	162	123,156	115,176	126,079	93,105
101	164,758	153,953	170,455	129,706	132	131,504	124,34	138,48	106,146	163	123,01	114,957	125,881	92,81
102	163,142	152,376	168,943	128,668	133	130,929	123,863	137,828	105,449	164	122,863	114,732	125,692	92,523
103	161,588	150,862	167,491	127,624	134	130,38	123,401	137,195	104,786	165	122,716	114,505	125,513	92,241
104	160,089	149,378	166,094	126,644	135	129,856	122,967	136,582	104,171	166	122,569	114,275	125,352	91,964
105	158,639	147,943	164,748	125,702	136	129,358	122,56	135,988	103,596	167	122,421	114,055	125,227	91,692
106	157,231	146,553	163,449	124,8	137	128,883	122,174	135,413	103,054	168	122,273	113,841	125,104	91,423
107	155,862	145,21	162,193	123,916	138	128,431	121,805	134,857	102,541	169	122,125	113,633	125,008	91,16
108	154,529	143,913	160,973	123,075	139	128	121,448	134,318	102,052	170	121,977	113,429	124,921	90,901
109	153,223	142,658	159,786	122,245	140	127,59	121,101	133,795	101,584	171	121,829	113,228	124,837	90,647
110	151,94	141,445	158,632	121,505	141	127,2	120,764	133,288	101,117	172	121,681	113,029	124,751	90,399
111	150,659	140,262	157,51	120,78	142	126,831	120,437	132,797	100,647	173	121,532	112,834	124,664	90,156
112	149,365	139,11	156,416	120,066	143	126,489	120,122	132,322	100,185	174	121,384	112,638	124,578	89,919
113	148,088	137,993	155,347	119,364	144	126,172	119,817	131,865	99,735	175	121,236	112,443	124,486	89,685
114	146,864	136,908	154,301	118,672	145	125,88	119,521	131,424	99,286	176	121,089	112,238	124,394	89,456
115	145,69	135,85	153,279	117,994	146	125,617	119,233	131	98,839	177	120,941	112,035	124,302	89,23
116	144,564	134,914	152,279	117,331	147	125,387	118,954	130,59	98,402	178	120,793	111,835	124,208	89,008
117	143,483	134,072	151,282	116,632	148	125,179	118,683	130,194	97,979	179	120,646	111,639	124,113	88,789
118	142,445	133,274	150,245	115,922	149	124,993	118,409	129,81	97,571	180	120,499	111,446	124,018	88,574
119	141,449	132,523	149,197	115,141	150	124,838	118,136	129,437	97,177	181	120,352	111,256	123,922	88,363
120	140,492	131,757	148,185	114,381	151	124,708	117,873	129,075	96,797	182	120,205	111,069	123,825	88,156
121	139,573	131,041	147,211	113,652	152	124,574	117,601	128,724	96,428	183	120,059	110,875	123,728	87,954
122	138,688	130,323	146,273	112,902	153	124,438	117,329	128,387	96,068	184	119,913	110,676	123,63	87,755
123	137,837	129,638	145,369	112,146	154	124,3	117,066	128,07	95,715	185	119,767	110,465	123,533	87,56

M : Merkez Tel Y: Yan Tel L1 : teller arası ısı iletimi mevcut LZ : teller arası ısı iletimi yok

Tablo A.2 Sayısal çözümlerin karşılaştırılması (ısıcılıklar °K)

süre	ANS Tel	ENT Tel	GE Tel	ANS Ara	ENT Ara	GE Ara	süre	ANS Tel	ENT Tel	GE Tel	ANS Ara	ENT Ara	GE Ara
0	298	339	293	298	301	293	31	475,348	481	483	387,066	394	397
1	334,31	357	333	300,09	306	299	32	477,324	483	485	388,366	396	399
2	354,23	370	350	303,939	311	305	33	479,277	485	487	389,715	398	400
3	368,002	380	362	308,699	316	310	34	481,2	487	488	391,114	400	400
4	378,697	389	372	313,79	320	315	35	483,085	489	490	392,569	402	401
5	387,598	397	381	318,876	324	320	36	484,924	491	491	394,066	403	402
6	394,635	406	389	323,682	329	325	37	486,723	492	492	395,657	405	403
7	399,565	412	398	328,011	333	329	38	488,499	494	494	397,473	407	404
8	404,099	418	406	332,178	337	333	39	490,267	496	495	399,958	408	405
9	408,121	422	413	336,124	340	338	40	492,025	498	496	402,415	410	406
10	412,153	426	419	339,842	344	342	41	493,778	499	497	404,653	412	407
11	416,099	430	424	343,351	347	346	42	495,524	501	499	406,756	413	408
12	419,985	434	429	346,688	350	349	43	497,264	503	500	408,751	415	411
13	423,981	437	433	349,879	353	353	44	498,998	504	501	410,708	416	413
14	428,032	440	437	352,951	356	356	45	500,73	506	503	412,649	418	415
15	432,263	443	441	355,935	359	359	46	502,458	507	504	414,533	420	417
16	436,093	446	444	358,785	362	362	47	504,18	509	506	416,359	421	418
17	439,421	449	447	361,502	364	365	48	505,893	511	507	418,152	423	419
18	442,494	452	451	364,105	367	368	49	507,592	512	508	419,928	424	421
19	445,493	455	454	366,594	369	371	50	509,272	514	509	421,664	426	422
20	448,404	457	456	368,963	372	373	51	510,934	515	511	423,318	427	423
21	451,235	460	459	371,245	374	376	52	512,577	517	512	424,952	429	424
22	454,039	462	462	373,441	376	378	53	514,201	518	513	426,576	430	425
23	456,798	464	464	375,53	378	380	54	515,804	520	514	428,199	432	426
24	459,478	467	467	377,505	381	383	55	517,385	521	514	429,815	433	427
25	462,017	469	469	379,316	383	385	56	518,943	523	515	431,417	434	427
26	464,455	471	472	381,006	385	387	57	520,479	524	516	433,001	436	429
27	466,81	473	474	382,482	387	389	58	521,995	525	517	434,568	437	430
28	469,076	475	476	383,554	389	391	59	523,493	527	519	436,113	439	431
29	471,245	477	478	384,643	391	393	60	524,976	528	520	437,64	440	432
30	473,324	479	480	385,818	393	395	61	526,45	530	521	439,153	441	434

ANS : ANSYS paket programı çözümü ENT : Entalpi metodu çözümü GE : Genel enjri metodu çözümü Tel : Tel sıcaklığı Ara : Boru-Manşon ara yüzey sıcaklığı

Tablo A.2 Sayısal çözümlerin karşılaştırılması (sıcaklıklar °K)

süre	ANS Tel	ENT Tel	GE Tel	ANS Ara	ENT Ara	GE Ara	süre	ANS Tel	ENT Tel	GE Tel	ANS Ara	ENT Ara	GE Ara
62	527,915	531	523	440,657	443	435	93	469,643	450	559	465,573	444	469
63	529,37	532	524	442,154	444	437	94	465,459	447	560	463,293	442	470
64	530,814	534	526	443,64	445	438	95	461,793	445	521	460,984	441	467
65	532,246	535	527	445,112	447	440	96	458,526	443	499	458,687	439	464
66	533,668	536	529	446,57	448	441	97	455,576	441	486	456,43	437	461
67	535,08	538	530	448,015	449	442	98	452,879	440	477	454,228	436	457
68	536,483	539	532	449,452	451	444	99	450,391	438	471	452,093	435	455
69	537,876	540	533	450,88	452	445	100	448,078	436	466	450,029	433	452
70	539,259	542	534	452,3	453	446	101	445,912	435	462	448,039	432	450
71	540,631	543	536	453,711	455	448	102	443,874	433	459	446,122	431	448
72	541,993	544	537	455,113	456	449	103	441,946	432	456	444,278	430	446
73	543,343	546	538	456,505	457	450	104	440,115	431	454	442,502	428	444
74	544,681	547	540	457,888	459	451	105	438,37	429	451	440,793	427	443
75	546,005	548	541	459,26	460	452	106	436,702	428	449	439,145	426	441
76	547,332	549	542	460,622	461	453	107	435,102	427	447	437,557	425	440
77	548,656	551	543	461,976	462	454	108	433,565	426	446	436,023	424	439
78	549,975	552	544	463,32	464	455	109	432,093	425	444	434,542	423	437
79	551,287	553	545	464,656	465	456	110	430,652	424	442	433,108	422	436
80	552,592	554	546	465,981	466	457	111	429,265	423	441	431,72	422	435
81	553,888	556	547	467,294	467	458	112	427,917	422	440	430,372	421	434
82	555,177	557	548	468,596	468	459	113	426,603	421	438	429,059	420	433
83	556,456	558	549	469,887	470	460	114	425,315	420	437	427,778	419	432
84	557,727	559	550	471,166	471	460	115	424,042	419	436	426,524	418	431
85	558,989	562	551	472,435	469	461	116	422,759	418	435	425,285	418	430
86	559,989	562	552	472,435	464	462	117	421,447	417	434	424,041	417	429
87	527,751	473	553	473,263	460	463	118	420,175	417	433	422,725	416	428
88	508,248	466	554	473,37	456	464	119	418,955	416	432	421,332	415	427
89	496,728	462	555	472,733	453	465	120	417,786	415	431	420,037	415	426
90	487,515	458	556	471,478	451	466	121	416,665	414	430	418,816	414	425
91	480,34	455	557	469,77	448	467	122	415,589	413	429	417,657	413	424
92	474,518	452	558	467,761	446	468	123	414,558	413	428	416,553	413	424

ANS : ANSYS paket programı çözümü

ENT : Entalpi metodu çözümü

GE : Genel enjri metodu çözümü

Tel : Tel sıcaklığı

Ara : Boru-Manşon ara yüzey sıcaklığı

Tablo A.2 Sayısal çözümlerin karşılaştırılması (sıcaklıklar °K)

süre	ANS Tel	ENT Tel	GE Tel	ANS Ara	ENT Ara	GE Ara	süre	ANS Tel	ENT Tel	GE Tel	ANS Ara	ENT Ara	GE Ara
124	413,567	412	427	415,497	412	423	155	397,482	396	412	398,091	398	410
125	412,616	411	426	414,486	412	423	156	397,349	396	411	397,991	398	409
126	411,703	411	426	413,517	411	422	157	397,218	396	411	397,919	397	409
127	410,825	410	425	412,588	410	421	158	397,086	395	411	397,845	397	409
128	409,982	409	424	411,696	410	421	159	396,953	395	411	397,764	397	408
129	409,172	409	423	410,84	409	420	160	396,819	395	410	397,678	396	408
130	408,394	408	423	410,017	409	419	161	396,685	394	410	397,586	396	408
131	407,645	408	422	409,226	408	419	162	396,549	394	410	397,489	396	408
132	406,927	407	422	408,465	408	418	163	396,413	393	410	397,387	395	408
133	406,237	406	421	407,735	407	417	164	396,275	393	409	397,282	395	408
134	405,574	406	420	407,034	407	417	165	396,137	393	409	397,174	395	408
135	404,939	405	420	406,362	406	417	166	395,998	392	409	397,063	394	407
136	404,33	405	419	405,716	406	416	167	395,858	392	409	396,949	394	407
137	403,745	404	419	405,096	405	416	168	395,717	392	409	396,832	394	407
138	403,184	404	418	404,501	405	415	169	395,576	392	409	396,714	393	407
139	402,647	403	418	403,931	404	415	170	395,435	391	408	396,593	393	407
140	402,136	403	417	403,384	404	414	171	395,292	391	408	396,471	393	407
141	401,65	402	417	402,861	403	414	172	395,15	391	408	396,348	393	407
142	401,187	402	416	402,36	403	414	173	395,007	390	408	396,223	392	407
143	400,746	401	416	401,882	403	413	174	394,865	390	408	396,097	392	407
144	400,327	401	416	401,428	402	413	175	394,721	390	408	395,97	392	406
145	399,932	401	415	400,995	402	412	176	394,578	389	408	395,842	391	406
146	399,564	400	415	400,586	401	412	177	394,435	389	407	395,713	391	406
147	399,219	400	414	400,201	401	412	178	394,292	389	407	395,583	391	406
148	398,896	399	414	399,839	401	412	179	394,148	389	407	395,453	391	406
149	398,603	398	414	399,501	400	411	180	394,005	388	407	395,322	390	406
150	398,338	398	413	399,189	400	411	181	393,862	388	407	395,191	390	406
151	398,101	398	413	398,906	399	411	182	393,719	388	407	395,06	390	406
152	397,906	398	413	398,649	399	410	183	393,576	388	407	394,928	390	406
153	397,754	397	412	398,426	399	410	184	393,433	387	407	394,796	389	405
154	397,617	397	412	398,238	398	410	185	393,291	387	407	394,664	389	405

ANS : ANSYS paket programı çözümü

ENT : Entalpi metodu çözümü

GE : Genel enjri metodu çözümü

Tel : Tel sıcaklığı

Ara : Boru-Manşon ara yüzey sıcaklığı

Tablo A.3 63 mm polietilen boru manşon kaynağı için sayısal çözüm ve
deneysel ölçümlerin karşılaştırılması (sıcaklıklar °C)

Sn.	S. Ara	D. Ara	D. Ara	D. Ara	S. B. İç	D. B. İç	S. M. Dış	D. M. Dış
0	25,0	26,0	26,0	26,0	25,0	26,0	25,0	26,0
1	27,1	26,8	26,8	28,6	25,0	26,8	25,0	28,6
2	30,9	26,2	27,1	31,6	25,0	26,8	25,0	28,6
3	35,7	26,8	34,5	29,2	25,1	26,8	25,0	28,6
4	40,8	36,0	28,8	34,6	25,1	26,8	25,0	28,6
5	45,9	47,0	34,8	25,1	25,1	29,8	25,0	28,6
6	50,7	40,1	32,8	39,9	25,1	27,4	25,0	28,6
7	55,0	45,8	49,9	58,2	25,1	28,8	25,0	28,6
8	59,2	50,5	44,8	58,8	25,1	26,8	25,0	28,6
9	63,1	49,0	56,7	49,9	25,1	27,1	25,0	28,6
10	66,8	52,3	80,1	63,5	25,2	26,8	25,0	28,6
11	70,4	63,8	64,1	71,2	25,2	23,9	25,0	28,6
12	73,7	67,1	76,0	74,2	25,2	25,9	25,0	28,6
13	76,9	77,7	73,6	77,7	25,2	27,1	25,0	28,6
14	80,0	81,5	77,4	80,7	25,3	26,8	25,0	28,6
15	82,9	78,9	75,4	83,1	25,3	29,8	25,0	28,6
16	85,8	79,8	69,4	84,9	25,4	28,3	25,0	28,6
17	88,5	74,4	77,7	87,9	25,5	26,8	25,0	28,6
18	91,1	77,7	77,7	89,7	25,6	26,8	25,1	28,6
19	93,6	86,7	83,7	109,4	25,7	24,7	25,1	28,6
20	96,0	86,3	93,5	93,8	25,8	26,8	25,1	28,6
21	98,2	92,6	88,1	96,8	25,9	30,4	25,1	28,6
22	100,4	92,6	89,6	116,6	26,0	30,4	25,1	28,6
23	102,5	93,8	84,9	117,2	26,2	27,7	25,2	28,6
24	104,5	94,1	93,2	122,0	26,3	23,9	25,2	29,2
25	106,3	98,0	104,0	120,2	26,5	27,7	25,3	29,2
26	108,0	103,0	102,8	119,0	26,7	27,4	25,3	28,6
27	109,5	91,4	100,6	110,0	26,9	30,6	25,4	29,2
28	110,6	102,8	94,4	125,6	27,1	27,4	25,4	29,2
29	111,6	101,6	104,0	117,8	27,3	24,4	25,5	29,2
30	112,8	106,4	106,4	110,6	27,5	25,9	25,5	29,2
31	114,1	108,2	115,4	113,0	27,8	28,6	25,6	29,2
32	115,4	111,8	110,0	113,6	28,0	32,2	25,7	29,8
33	116,7	111,2	102,8	114,8	28,3	28,6	25,8	29,8
34	118,1	112,4	106,6	116,0	28,6	29,2	25,9	29,8
35	119,6	108,2	115,6	117,8	28,9	29,2	26,0	30,4
36	121,1	116,2	126,2	119,0	29,2	28,6	26,1	31,0
37	122,7	117,4	126,8	120,8	29,5	29,4	26,2	30,4
38	124,5	126,4	121,6	103,4	29,9	30,6	26,3	31,0
39	127,0	120,8	123,8	108,8	30,2	33,0	26,4	31,0
40	129,4	122,2	119,0	108,8	30,6	31,2	26,6	31,6
41	131,7	119,8	122,0	109,4	30,9	31,2	26,7	31,6
42	133,8	122,6	127,4	119,6	31,3	29,4	26,9	32,2
43	135,8	126,2	137,3	109,4	31,7	31,6	27,0	32,2
44	137,7	134,6	134,0	121,4	32,0	33,0	27,2	32,8
45	139,6	136,5	136,1	130,4	32,4	33,3	27,3	32,8
46	141,5	130,4	134,6	132,3	32,8	36,3	27,5	32,8
47	143,4	133,4	129,2	132,3	33,2	35,1	27,7	33,4
48	145,2	129,2	136,5	134,7	33,7	34,5	27,8	33,4
49	146,9	129,8	138,3	136,5	34,1	34,5	28,0	34,0
50	148,7	136,1	143,7	138,3	34,5	35,1	28,2	34,0
51	150,3	141,3	146,1	139,5	34,9	34,2	28,4	34,6
52	152,0	143,1	156,4	142,8	35,4	36,3	28,6	34,6

S.: sayısal çözüm D.: deneysel ölçüm Ara : boru-manşon ara yüzeyi B.: boru M.: manşon

Tablo A.3 63 mm polietilen boru manşon kaynağı için sayısal çözüm ve deneysel ölçümlerin karşılaştırılması (sıcaklıklar °C)

SN.	S. Ara	D. Ara	D. Ara	D. Ara	S. B. İç	D. B. İç	S. M. Dış	D. M. Dış
53	153,6	145,5	159,5	145,0	35,8	36,3	28,8	34,6
54	155,2	154,6	153,6	162,5	36,3	36,9	29,1	35,2
55	156,8	151,0	154,0	148,0	36,7	40,4	29,3	35,2
56	158,4	151,2	155,8	170,4	37,2	39,9	29,5	35,7
57	160,0	152,8	157,6	169,8	37,6	40,4	29,7	36,3
58	161,6	154,9	151,0	167,4	38,1	39,3	30,0	35,7
59	163,1	149,2	155,2	175,3	38,6	39,5	30,2	36,3
60	164,6	158,3	156,1	174,7	39,0	39,9	30,5	36,9
61	166,2	153,4	164,6	166,2	39,5	40,7	30,7	36,9
62	167,7	157,9	167,0	163,1	40,0	38,3	31,0	37,5
63	169,2	162,5	171,6	174,1	40,5	39,9	31,2	38,1
64	170,6	165,2	169,2	166,8	40,9	39,9	31,5	38,1
65	172,1	166,1	178,9	169,2	41,4	42,5	31,7	38,1
66	173,6	173,4	172,2	170,4	41,9	42,8	32,0	38,7
67	175,0	169,2	174,3	172,2	42,4	45,8	32,3	39,3
68	176,5	167,0	175,9	174,1	42,9	45,8	32,6	39,3
69	177,9	172,2	168,0	158,9	43,4	45,2	32,8	39,9
70	179,3	166,8	174,0	177,7	43,9	45,2	33,1	39,9
71	180,7	175,3	179,8	159,5	44,4	42,8	33,4	40,5
72	182,1	174,6	181,3	165,0	44,9	43,6	33,7	40,5
73	183,5	177,7	189,8	175,3	45,3	45,8	34,0	41,1
74	184,9	185,6	181,9	167,4	45,8	47,0	34,3	41,1
75	186,3	180,7	185,0	172,9	46,3	49,9	34,6	41,7
76	187,6	181,3	186,4	182,6	46,8	50,5	34,9	42,3
77	189,0	183,2	179,5	189,3	47,3	48,7	35,2	42,3
78	190,3	180,4	188,6	183,2	47,8	49,6	35,5	42,8
79	191,7	185,0	189,8	190,4	48,3	48,4	35,8	42,8
80	193,0	186,4	196,5	193,5	48,8	48,7	36,1	43,4
81	194,3	194,7	195,3	196,0	49,2	50,5	36,4	43,4
82	195,6	191,1	193,5	197,2	49,6	54,6	36,7	44,0
83	196,9	190,5	186,8	198,4	50,1	52,9	37,1	44,0
84	198,2	191,7	191,1	200,2	50,5	54,0	37,4	44,6
85	199,4	192,3	196,5	201,4	50,9	52,9	37,7	45,2
86	199,4	193,5	197,7	201,4	50,9	53,5	37,7	45,2
87	200,3	194,1	198,4	200,2	51,4	54,0	38,0	45,2
88	200,4	193,5	198,4	199,0	51,8	54,0	38,3	45,8
89	199,7	192,9	197,7	196,6	52,3	55,2	38,7	45,8
90	198,5	191,7	196,5	194,1	52,8	55,8	39,0	46,4
91	196,8	189,8	195,3	191,7	53,2	55,8	39,3	47,0
92	194,8	188,0	194,3	189,3	53,7	57,0	39,7	47,0
93	192,6	186,4	192,3	186,8	54,2	57,0	40,0	47,0
94	190,3	184,4	191,3	185,0	54,6	57,6	40,3	47,6
95	188,0	181,9	189,8	182,6	55,1	58,2	40,7	47,6
96	185,7	180,1	188,0	180,1	55,6	58,8	41,0	48,2
97	183,4	178,3	186,8	178,3	56,1	58,8	41,3	48,8
98	181,2	176,5	185,8	175,9	56,6	59,4	41,7	48,8
99	179,1	175,3	184,4	174,1	57,1	60,0	42,0	49,3
100	177,0	173,4	182,6	172,2	57,5	60,6	42,4	49,9
101	175,0	171,9	181,3	170,4	58,0	61,1	42,7	49,9
102	173,1	169,8	180,1	168,6	58,5	61,7	43,0	49,9
103	171,3	168,0	178,9	166,8	59,0	62,3	43,4	50,5
104	169,5	166,8	177,7	165,0	59,5	62,3	43,7	50,5
105	167,8	165,5	176,5	163,7	60,0	62,9	44,1	51,1

S.: sayısal çözüm D.: deneysel ölçüm Ara : boru-manşon ara yüzeyi B.: boru M.: manşon

ÖZGEÇMİŞ

Erdoğan TOZAN, 1969 yılında Sivas ili Suşehri ilçesinde doğdu. İlk ve orta öğrenimini İstanbul'da tamamladı. Gültepe Endüstri Meslek Lisesi Elektronik Bölümünden 1986 yılında okul birincisi olarak mezun olduktan sonra aynı yıl İstanbul Teknik Üniversitesi Makina Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümünde üniversite öğrenimine başladı. 1990 yılında iyi dereceyle bu bölümden mezun olduktan sonra aynı üniversitede yüksek lisans eğitimine başladı ve 1993 yılında pekiyi derece ile tamamladı. 1993 yılında İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Mühendisliği Ana Bilim Dalı Enerji programında doktora çalışmasına başladı.

T.C. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU
DOKÜMANLARI İÇİN
BİREKİZ