

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**139683**

**YAPI MALZEMELERİNİN GÖZENEKLİLİKLERİNE  
BAĞLI OLARAK ISI İLETİM KATSAYISININ TAYİNİ**

**139683**

**Makine Mühendisi Uğur AKBULUT**

**FBE Makine Mühendisliği Anabilim Dalı Isı-Proses Programında Hazırlanan**

**YÜKSEKLİSANS TEZİ**

**Tez Danışmanı : Yrd. Doç. Dr. Ahmet KOYUN**

**Yrd. Doç. Dr. Ahmet KOYUN**

**Doç. Dr. Dürrüye BİLGE**

**Doç. Dr. Tamer YILMAZ**

**İSTANBUL, 2003**

**TC YÜKSEKÖĞRETİM KURULU  
TEZ KÜMÜLTASYON BİREKEM**

# İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ .....	iv
ŞEKİL LİSTESİ .....	v
ÇİZELGE LİSTESİ .....	viii
ÖNSÖZ.....	ix
ÖZET .....	x
ABSTRACT .....	xi
1 GİRİŞ.....	1
1.1 Gözenekli Ortam.....	2
1.2 Por Yapısı .....	3
1.3 Gözeneklilik.....	6
2 GÖZENEKLİ ORTAMDA ISI GEÇİŞİ.....	10
2.1 Isı İletimi Genel Denklemi .....	10
2.1.1 Kartezyen koordinatlarda sürekli rejimde ve ısı üretimi olmayan bir sistemde tek boyutlu ısı iletimi.....	12
2.1.2 Gözenekli ortamda etkin ısı iletim katsayısının tayin edilmesi.....	13
3 DENEYSEL ÇALIŞMALAR HAZIRLIK.....	20
3.1 Isı İletim Katsayısının Ölçülmesi .....	20
3.1.1 Bu çalışmada ısı iletim katsayısını ölçmede kullanılan metot.....	21
3.1.2 Deneyin yapılışı.....	25
3.2 Numunelerin Hazırlanması.....	25
3.2.1 Suni gözenekli ortam oluşturulması .....	25
3.2.2 Piyasadan alınan sert polistren köpükler .....	27
3.3 Gözenekliliğin Ölçülmesi .....	30
3.4 Termokupların Kalibrasyonu.....	31
4 DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	32
4.1 Bir Katlı Gözenekli Levhanın Isı İletim Katsayısının Ölçümü .....	32
4.2 İki Katlı Gözenekli Levhanın Isı İletim Katsayısının Ölçümü.....	40
4.3 Üç Katlı Gözenekli Levhanın Isı İletim Katsayısının Ölçümü.....	47
4.4 Dört Katlı Gözenekli Levhanın Isı İletim Katsayısının Ölçümü.....	52
4.5 Beş Katlı Gözenekli Levhanın Isı İletim Katsayısının Ölçümü .....	56
4.6 Sert Polistren Köpük Malzemenin Isı İletim Katsayısının Ölçümü .....	62
4.6.1 A numunesinin ısı iletim katsayısının tayini .....	62
4.6.2 B numunesinin ısı iletim katsayısının tayini.....	66
4.6.3 E numunesinin ısı iletim katsayısının tayini .....	70
4.6.4 F numunesinin ısı iletim katsayısının tayini .....	74
5 DENEY SONUÇLARININ DAHA ÖNCE YAPILMIŞ MATEMATİKSEL MODELLERLE KARŞILAŞTIRILMASI .....	79

6.	SONUÇLAR VE ÖNERİLER .....	82
	KAYNAKLAR.....	83
	EKLER .....	84
Ek 1	Termokuplların Kalibrasyon eğrileri .....	85
	ÖZGEÇMİŞ.....	88



## SİMGE LİSTESİ

$a$	Isıl difüzyon katsayısı
$A$	Numunelerin ısı akısına dik kesit alanı
$c_p$	Özgül ısınma ısısı
$K$	Isı iletim katsayısı
$M$	Kütle
$M_b$	Akışkan fazın toplam kütlesi
$M_d$	Katı fazın toplam kütlesi
$M_t$	Toplam kütle
$q_i$	İğnenin birim boyuna verilen elektrik enerjisi
$Q$	Sistemin çevresi ile net ısı transferi
$t$	Zaman
$T$	Sıcaklık
$TC$	Termokupl
$\Delta T$	Numunenin maruz kaldığı sıcaklık gradyeni
$\Delta U$	Sistemin iç enerjisindeki değişim
$\varepsilon$	Porozite
$V$	Hacim
$V_b$	Akışkan fazın toplam hacmi
$V_d$	Katı fazın toplam hacmi
$V_t$	Toplam hacim
$W$	Sistemden elde edilen net iş
$\Delta X$	Numunelerin ısı akısı doğrultusundaki uzunluğu
$\lambda$	Isıl iletkenlik
$\lambda_e$	Etkin ısı iletkenlik
$\lambda_f$	Akışkan fazın ısı iletkenliği
$\lambda_s$	Katı fazın ısı iletkenliği
$\rho$	Yoğunluk
$\rho_t$	Toplam yoğunluk
$\rho_b$	Akışkan fazın toplam yoğunluğu
$\rho_d$	Katı fazın toplam yoğunluğu
$\nabla$	Birim vektör

## ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1.1	Doğal gözenekli malzeme örnekleri.....	2
Şekil 1.2	Gözenekli ortamda nakil, reaksiyon ve faz değişimi .....	3
Şekil 1.3	Gözenekli ortamda por düzeyinde aktarımın, reaksiyonun ve faz değişiminin gösterilmesi.....	4
Şekil 1.4	Gergin paslanmaz çelik ekranın elektron mikrografi .....	5
Şekil 1.5	Poliüretan köpük ve bir kumtaşı parçasının elektron mikrografi.....	5
Şekil 2.1	Kartezyen koordinatlarda bir katı cisim içinde kontrol hacmi olarak alınan bir diferansiyel eleman .....	10
Şekil 2.2	Gözenekli ortamda ısı iletkenliğinin şema üzerinde gösterimi.....	14
Şekil 2.3	Kübik bir yatağın üç türlü istiflenmesi.....	14
Şekil 3.1	Deney düzeneğinin genel bir görünüşü .....	21
Şekil 3.2	Deney düzeneğinin sıcak oda tarafından çekilmiş bir görüntüsü .....	22
Şekil 3.3	Deney düzeneğinin soğuk oda tarafından çekilmiş bir görüntüsü .....	22
Şekil 3.4	Deney düzeneğinin şeması.....	23
Şekil 3.5	Boncukların levhaya dizilişi .....	25
Şekil 3.6	Numune plakanın poliüretan köpükten bir çerçeveye yerleştirilerek çevresinin yalıtılması .....	26
Şekil 3.7	Sert polistren köpüklerden A numunesi .....	27
Şekil 3.8	Sert polistren köpüklerden B numunesi.....	27
Şekil 3.9	Sert polistren köpüklerden E numunesi.....	28
Şekil 3.10	Sert polistren köpüklerden F numunesi .....	28
Şekil 4.1	Numune odası sıcaklığı-zaman grafiği .....	35
Şekil 4.2	Soğukyüz3 sıcaklığı-zaman grafiği.....	36
Şekil 4.3	Soğukyüz2 sıcaklığı-zaman grafiği .....	36
Şekil 4.4	Soğuk oda sıcaklığı-zaman grafiği .....	36
Şekil 4.5	Sıcakyüz1 sıcaklığı-zaman grafiği .....	37
Şekil 4.6	Sıcakyüz2 sıcaklığı-zaman grafiği .....	37
Şekil 4.7	Soğukyüz1 sıcaklığı-zaman grafiği .....	37
Şekil 4.8	Sıcak oda sıcaklığı-zaman grafiği .....	38
Şekil 4.9	Sıcakyüz3 sıcaklığı-zaman grafiği .....	38
Şekil 4.10	Sıcakyüz3-soğukyüz3 sıcaklıklarının karşılaştırılması .....	38
Şekil 4.11	Sıcakyüz2-soğukyüz2 sıcaklıklarının karşılaştırılması .....	39
Şekil 4.12	Sıcakyüz1-soğukyüz1 sıcaklıklarının karşılaştırılması .....	39
Şekil 4.13	Numune odası sıcaklığı-zaman grafiği .....	42
Şekil 4.14	Soğukyüz3 sıcaklığı-zaman grafiği .....	42
Şekil 4.15	Soğukyüz2 sıcaklığı-zaman grafiği.....	42
Şekil 4.16	Soğuk oda sıcaklığı-zaman grafiği .....	43
Şekil 4.17	Sıcakyüz1 sıcaklığı-zaman grafiği .....	43
Şekil 4.18	Sıcakyüz2 sıcaklığı-zaman grafiği .....	43
Şekil 4.19	Soğukyüz1 sıcaklığı-zaman grafiği .....	44
Şekil 4.20	Sıcak oda sıcaklığı-zaman grafiği .....	44
Şekil 4.21	Sıcakyüz3 sıcaklığı-zaman grafiği .....	44
Şekil 4.22	Sıcakyüz3-soğukyüz3 sıcaklıklarının karşılaştırılması .....	45
Şekil 4.23	Sıcakyüz2-soğukyüz2 sıcaklıklarının karşılaştırılması .....	45
Şekil 4.24	Sıcakyüz1-soğukyüz1 sıcaklıklarının karşılaştırılması .....	45
Şekil 4.25	Numune odası sıcaklığı-zaman grafiği .....	47
Şekil 4.26	Soğukyüz3 sıcaklığı-zaman grafiği.....	47
Şekil 4.27	Soğukyüz2 sıcaklığı-zaman grafiği.....	48
Şekil 4.28	Soğuk oda sıcaklığı-zaman grafiği.....	48
Şekil 4.29	Sıcakyüz1 sıcaklığı-zaman grafiği .....	48

Şekil 4.30 Sıcakyüz2 sıcaklığı-zaman grafiği .....	49
Şekil 4.31 Soğukyüz1 sıcaklığı-zaman grafiği .....	49
Şekil 4.32 Sıcak oda sıcaklığı-zaman grafiği .....	49
Şekil 4.33 Sıcakyüz3 sıcaklığı-zaman grafiği .....	50
Şekil 4.34 Sıcakyüz3-soğukyüz3 sıcaklıklarının karşılaştırılması .....	50
Şekil 4.35 Sıcakyüz2-soğukyüz2 sıcaklıklarının karşılaştırılması .....	50
Şekil 4.36 Sıcakyüz1-soğukyüz1 sıcaklıklarının karşılaştırılması .....	51
Şekil 4.37 Numune odası sıcaklığı-zaman grafiği .....	52
Şekil 4.38 Soğukyüz2 sıcaklığı-zaman grafiği .....	52
Şekil 4.39 Soğuk oda sıcaklığı-zaman grafiği .....	53
Şekil 4.40 Sıcakyüz1 sıcaklığı-zaman grafiği .....	53
Şekil 4.41 Sıcakyüz2 sıcaklığı-zaman grafiği .....	53
Şekil 4.42 Soğukyüz1 sıcaklığı-zaman grafiği .....	54
Şekil 4.43 Sıcak oda sıcaklığı-zaman grafiği .....	54
Şekil 4.44 Sıcakyüz2-soğukyüz2 sıcaklıklarının karşılaştırılması .....	54
Şekil 4.45 Sıcakyüz1-soğukyüz1 sıcaklıklarının karşılaştırılması .....	55
Şekil 4.46 Numune odası sıcaklığı-zaman grafiği .....	56
Şekil 4.47 Numune odası sıcaklığı-zaman grafiği .....	56
Şekil 4.48 Soğuk oda sıcaklığı-zaman grafiği .....	57
Şekil 4.49 Sıcakyüz1 sıcaklığı-zaman grafiği .....	57
Şekil 4.50 Sıcakyüz2 sıcaklığı-zaman grafiği .....	57
Şekil 4.51 Soğukyüz1 sıcaklığı-zaman grafiği .....	58
Şekil 4.52 Sıcak oda sıcaklığı-zaman grafiği .....	58
Şekil 4.53 Sıcakyüz2-soğukyüz2 sıcaklıklarının karşılaştırılması .....	58
Şekil 4.54 Sıcakyüz1-soğukyüz1 sıcaklıklarının karşılaştırılması .....	59
Şekil 4.55 Levha kat adedi-ısı iletkenlik .....	59
Şekil 4.56 Levha kat adedi-ısı direnç .....	60
Şekil 4.57 Gözeneklilik- ısı iletkenlik .....	60
Şekil 4.58 Numune odası sıcaklığı-zaman grafiği .....	62
Şekil 4.59 Soğukyüz2 sıcaklığı-zaman grafiği .....	62
Şekil 4.60 Soğuk oda sıcaklığı-zaman grafiği .....	62
Şekil 4.61 Sıcakyüz1 sıcaklığı-zaman grafiği .....	63
Şekil 4.62 Sıcakyüz2 sıcaklığı-zaman grafiği .....	63
Şekil 4.63 Soğukyüz1 sıcaklığı-zaman grafiği .....	63
Şekil 4.64 Sıcak oda sıcaklığı-zaman grafiği .....	64
Şekil 4.65 Sıcakyüz2-soğukyüz2 sıcaklıklarının karşılaştırılması .....	64
Şekil 4.66 Sıcakyüz1-soğukyüz1 sıcaklıklarının karşılaştırılması .....	64
Şekil 4.67 Numune odası sıcaklığı-zaman grafiği .....	66
Şekil 4.68 Soğukyüz2 sıcaklığı-zaman grafiği .....	66
Şekil 4.69 Soğukyüz2 sıcaklığı-zaman grafiği .....	66
Şekil 4.70 Sıcakyüz1 sıcaklığı-zaman grafiği .....	67
Şekil 4.71 Sıcakyüz2 sıcaklığı-zaman grafiği .....	67
Şekil 4.72 Soğukyüz1 sıcaklığı-zaman grafiği .....	67
Şekil 4.73 Sıcak oda sıcaklığı-zaman grafiği .....	68
Şekil 4.74 Sıcakyüz2-soğukyüz2 sıcaklıklarının karşılaştırılması .....	68
Şekil 4.75 Sıcakyüz1-Soğukyüz1 sıcaklıklarının karşılaştırılması .....	68
Şekil 4.76 Numune odası sıcaklığı-zaman grafiği .....	70
Şekil 4.77 Soğukyüz2 sıcaklığı-zaman grafiği .....	70
Şekil 4.78 Soğuk oda sıcaklığı-zaman grafiği .....	70
Şekil 4.79 Sıcakyüz1 sıcaklığı-zaman grafiği .....	71
Şekil 4.80 Sıcakyüz2 sıcaklığı-zaman grafiği .....	71

Şekil 4.81 Soğukyüz1 sıcaklığı-zaman grafiği .....	71
Şekil 4.82 Sıcak oda sıcaklığı-zaman grafiği .....	72
Şekil 4.83 Sıcakyüz2-soğukyüz2 sıcaklıklarının karşılaştırılması .....	72
Şekil 4.84 Sıcakyüz1-soğukyüz1 sıcaklıklarının karşılaştırılması .....	72
Şekil 4.85 Numune odası sıcaklığı-zaman grafiği .....	74
Şekil 4.86 Soğukyüz2 sıcaklığı-zaman grafiği .....	74
Şekil 4.87 Soğuk oda sıcaklığı-zaman grafiği .....	74
Şekil 4.88 Sıcakyüz1 sıcaklığı-zaman grafiği .....	75
Şekil 4.89 Sıcakyüz2 sıcaklığı-zaman grafiği .....	75
Şekil 4.90 Soğukyüz1 sıcaklığı-zaman grafiği .....	75
Şekil 4.91 Sıcak oda sıcaklığı-zaman grafiği .....	76
Şekil 4.92 Sıcakyüz2-soğukyüz2 sıcaklıklarının karşılaştırılması .....	76
Şekil 4.93 Sıcakyüz1-soğukyüz1 sıcaklıklarının karşılaştırılması .....	76
Şekil 4.94 Yoğunluk-ısı iletim katsayısı .....	77
Şekil 4.95 Gözeneklilik -ısı iletkenlik .....	77
Şekil 5.1 Deney sonuçları ve matematik modeller .....	78
Şekil Ek 1.1 TC1 kalibrasyon eğrisi .....	83
Şekil Ek 1.2 TC2 kalibrasyon eğrisi .....	83
Şekil Ek 1.3 TC3 kalibrasyon eğrisi .....	83
Şekil Ek 1.4 TC4 kalibrasyon eğrisi .....	84
Şekil Ek 1.5 TC5 kalibrasyon eğrisi .....	84
Şekil Ek 1.6 TC6 kalibrasyon eğrisi .....	84
Şekil Ek 1.7 TC7 kalibrasyon eğrisi .....	85
Şekil Ek 1.8 TC8 kalibrasyon eğrisi .....	85
Şekil Ek 1.9 TC9 kalibrasyon eğrisi .....	85

## ÇİZELGE LİSTESİ

Çizelge 1.1 Bazı maddelerin gözeneklilikleri .....	8
Çizelge 2.1 Küresel parçacıklı yatak için bazı parametreler.....	15
Çizelge 2.2 Etkin ısı iletkenliği hakkında yapılmış çalışmalar .....	17
Çizelge 3.1 Sert polistren köpük numunelerin numaraları ve boyutları.....	26
Çizelge 4.1 Termokupllardan alınan sıcaklık değerleri .....	31
Çizelge 4.2 Düzeltilmiş sıcaklık değerleri .....	32
Çizelge 4.3 Isıl iletkenliğin hesabı .....	34
Çizelge 4.4 Termokupllardan alınan sıcaklık değerleri .....	39
Çizelge 4.5 Düzeltilmiş sıcaklık değerleri .....	40
Çizelge 4.6 Isıl iletkenliğin hesabı .....	41
Çizelge 4.7 Termokupllardan alınan sıcaklık değerleri .....	46
Çizelge 4.8 Düzeltilmiş sıcaklık değerleri .....	46
Çizelge 4.9 Isıl iletkenliğin hesabı .....	46
Çizelge 4.10 Termokupllardan alınan sıcaklık değerleri .....	51
Çizelge 4.11 Düzeltilmiş sıcaklık değerleri .....	51
Çizelge 4.12 Isıl iletkenliğin hesabı .....	52
Çizelge 4.13 Termokupllardan alınan sıcaklık değerleri .....	55
Çizelge 4.14 Düzeltilmiş sıcaklık değerleri .....	55
Çizelge 4.15 Isıl iletkenliğin hesabı .....	56
Çizelge 4.16 Termokupllardan alınan sıcaklık değerleri .....	61
Çizelge 4.17 Düzeltilmiş sıcaklık değerleri .....	61
Çizelge 4.18 Isıl iletkenliğin hesabı .....	61
Çizelge 4.19 Termokupllardan alınan sıcaklık değerleri .....	65
Çizelge 4.20 Düzeltilmiş sıcaklık değerleri .....	65
Çizelge 4.21 Isıl iletkenliğin hesabı .....	65
Çizelge 4.22 Termokupllardan alınan sıcaklık değerleri .....	69
Çizelge 4.23 Düzeltilmiş sıcaklık değerleri .....	69
Çizelge 4.24 Isıl iletkenliğin hesabı .....	69
Çizelge 4.25 Termokupllardan alınan sıcaklık değerleri .....	73
Çizelge 4.26 Düzeltilmiş sıcaklık değerleri .....	73
Çizelge 4.27 Isıl iletkenliğin hesabı .....	73

## ÖNSÖZ

Günümüz şartlarında artan enerji maliyetleri yapılarda ısı yalıtımı teknikleri uygulanarak tasarrufa görünmesini hızlandırdı. Ayrıca enerji üretiminin büyük çoğunluğunun halen fosil yakıtların yakılması ile sağlanması doğal dengeyi bozduğundan gelişen toplumlar enerji tasarrufuna ve alternatif enerji kaynaklarından yararlanma konusuna daha ciddi yaklaşmaktadırlar. Dolayısıyla malzemelerin ısıl iletkenliklerinin bilinmesi daha fazla önem kazanmıştır.

Isı yalıtımının ana prensibi malzemenin gözenekliliğini arttırmak ve gözenek boyutlarını küçültmektir. Bu şartlarda taşınım ile ısı transferi ihmal edilecek düzeyde gerçekleşir. Düşük sıcaklıklarda da ışımla ısı transferi ihmal edilebilmektedir. Böylece ısı transferinin sadece iletimle gerçekleştiği kabul edilebilir. Yalıtım malzemelerinde gözenekler arasında hapis olmuş hava veya gaz bulunmaktadır. Malzemenin akışkan kısmı olarak adlandırılabilir bu kısmın ısıl iletkenliği katı kısma göre oldukça düşüktür. Dolayısıyla malzemenin etkin ısıl iletkenliğini azaltacaktır.

Bu şartlar altında gözenekli ortamlarda ısı iletkenliğinin incelenmesi önem kazanmaktadır. Bu yönde yapılacak çalışmalar malzemelerin mikro yapısının tanınması yanında yalıtım malzemelerinin üretiminde temel prensipleri ortaya çıkaracaktır.

Bu çalışmada teorik bilgilerin yanında deneysel bir çalışma biçimi esas alınmıştır. Böylelikle bilimsel bir çalışmanın iki unsuru olan teori ve deneyin bir arada kullanılması için güzel bir uygulama olmuştur. Bu bağlamda tez çalışmamda benden maddi manevi desteğini esirgemeyen başta tez yürütücüm Yrd. Doç. Dr. Ahmet KOYUN olmak üzere, Termodinamik ve Isı Tekniği Anabilim dalı başkanı ve öğretim üyelerine, moral desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen araştırma görevlisi arkadaşlarıma teşekkürü bir borç bilirim.

Saygılarımla,

Uğur AKBULUT

## ÖZET

Gözeneklilik malzemenin fiziksel özellikleri açısından çok önemlidir. Ancak malzemenin mikro yapısının bir sonucu olduğundan anlaşılması ve anlatılması güç bir kavram olarak anılır. En fazla etkilediği fiziksel özelliklerden biri de malzemenin etkin ısı iletkenliğidir. Özellikle yalıtım malzemeleri için bu özellik son derece önemlidir. Bu çalışmada; öncelikle gözeneklilik hakkında teorik bilgi verilmiş, bu kavram anlatıldıktan sonra gözenekli ortamda etkin ısı iletkenliğinin tespiti konusunda yapılan çalışmalar özetlenmiştir. Daha sonra suni olarak elde edilen gözenekli ortamlar (levha) ve piyasadan hazır olarak alınan sert polistren köpük levhalar üzerinde ölçümler yapılmıştır. Bu ölçümler kartezyen koordinatlarda, ısı üretimi olmayan, sürekli rejim halindeki sistemler için ısı iletimi denkleminde faydalanılarak değerlendirilmiştir. Ayrıca deneylerle elde edilen sonuçlar daha önce önerilmiş matematik modeller kullanarak değerlendirilmiştir. Bu değerlendirmeyi yapmak için matematik modellerin grafikleri, deney numuneleri polistren ve havadan oluşan bir karma malzeme olarak kabul edilerek ve geçerli olan  $\lambda_s$  (katı kısmın ısı iletkenliği) ve  $\lambda_f$  (akışkan kısmın ısı iletkenliği) değerleri modellerin denklemlerinde birer sabit olarak uygulanarak çizilmiştir.

**Anahtar kelimeler:** Gözeneklilik, ısı iletkenlik, gözenekli ortam, ısı iletim katsayısı.

## **ABSTRACT**

Porosity is very important for materials in terms of physical properties. However, to understand and explain porosity is very difficult due to the fact that it depends on the materials' micro-structure. Effective thermal conductivity is one of the most affected properties by porosity. Especially it's very important for insulation materials. In this study; firstly it was informed about porosity then the studies which are about obtaining thermal conductivity in porous media were summarized. Furthermore, porous plates which are bought from the insulation market such as extruded polystyrene and porous plates which were made by us are measured in terms of effective thermal conductivity. These measurements were evaluated using thermal conductivity equation for systems which has Cartesian coordinates, steady state conditions and no heat production. Apart from this the results which were obtained from experiments were evaluated according to the former proposed mathematical models.

**Keywords:** Porosity, thermal conductivity, porous media, heat conduction coefficient.



## 1. GİRİŞ

Endüstriyel uygulamalarda kullanılacak malzemeler seçilirken malzemelerin fiziksel özelliklerinin iyi tanınması yapılacak işin performansı açısından son derece önemlidir. Ancak bu sayede optimum maliyet-etkinlik düzeyini elde ederek mühendislik etiğinin gereğini yerine getirmiş oluruz.

Malzemelerin fiziksel özellikleri büyük ölçüde mikro yapılarına bağlıdır. Dolayısıyla malzemeler üzerinde yapılacak deneysel çalışmaların mikro yapı ile ilişkilendirilmesi daha doğru sonuçlara ulaşmamız açısından gereklidir.

Gözenekli malzemeler teknik uygulamalara son derece elverişlidirler. Termik izolasyonda, otomotiv katalitik dönüştürücülerde, kimyasal katalizörlerde, nükleer reaktör yakıt çubuklarında, ısı dönüştürücülerinde, vb. , bulunurlar. Dolayısıyla gözenekli malzemelerde kütle ve ısı transferi ile ilgili yapılmış ve yapılacak araştırmaların önemi büyüktür. Bu tür malzemelerde ısı ve kütle transferi malzemenin gözenekliliğinden (porozitesinden) oldukça etkilenir. Gözeneklilik ise mikro yapı ile ilişkilidir dolayısıyla gelişmiş ülkelerde büyük firmalar ürünlerini tarafsız laboratuvarlarda test ettirme hatta bu amaçla bünyelerinde laboratuvarlar kurma yoluna gitmişlerdir.

Gözenekli malzemelerde, ısı üç süreçte yayılır: katı fazda ısı iletimi, gözenekler arasında ısı ışınımı ve gözenekler içinde ısı taşınımı. Küçük boyutta gözeneklerin içindeki ısı taşınımı ihmal edilebilir düzeydedir. Isı ışınımı ise düşük sıcaklıklarda ihmal edilebilir. Dolayısıyla gözenekli malzemelerde ısı iletiminin incelenmesi daha da önem kazanmaktadır. Dolayısıyla ben de bu konuda deneysel bir çalışma yapmış bulunmaktayım.

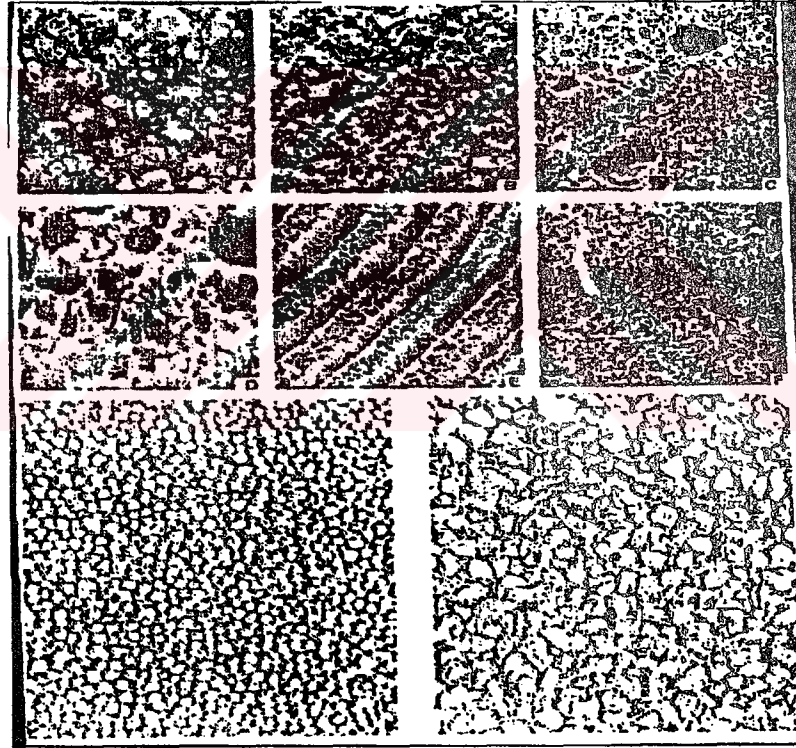
Gözenekli malzemelerde ısı iletimini inceleyen çalışmaların bir kısmı deneysel, bir kısmı ise teori ağırlıklıdır. Yapılan en önemli çalışmalar deney sonuçlarının değerlendirilmesiyle elde edilen matematik modeller içeren çalışmalardır. Bu çalışmalarda genellikle ısı iletim katsayısı malzemenin katı ve akışkan fazının ısı iletim katsayısının ve gözenekliliğinin bir fonksiyonu olarak verilmiştir. Bazılarında ise gözenekliliğin değişimi göz önüne alınmamıştır.

Yaptığım bu çalışmada birbirine temaslı olan küresel tanecikli katı faz içeren 5 ve tamamen birbirinden ayrı olan küresel tanecikli katı faz içeren 4 numuneden elde ettiğim deney sonuçlarına göre gözenekli malzemelerde etkin ısı iletkenliği belirlemede kullanılan çeşitli matematik modelleri mukayese etmiş bulunmaktayım. Bu sayede konunun tekrar gündeme getirilerek daha iyi anlaşılacağını umuyorum.

### 1.1 Gözenekli Ortam

Gözenekli ortam, birbirlerine bağlı boşluk oranıyla katı bir matrisi içeren bir malzemedir. Katı matris sert (genelde) yada küçük çapta deformasyona uğramış olabilir. Boşlukların (por yada gözenek de denir) birbirleriyle bağlantılı olması bir yada daha fazla akışkanın malzemenin içinde akışını sağlar. En basit durumda (“tek-fazlı akış”) boşluk oranı tek akışkanla doyurulur. “İki fazlı akış” ta ise bir sıvı ve bir gaz boşluğu paylaşır.

Doğal bir gözenekli ortamda şekle ve boyuta göre porların dağılımı düzensizdir. Kumsal kumu, kumtaşı, kireçtaşı, çavdar ekmeği ve insan akciğeri doğal gözenekli ortam örnekleridir (Şekil 1.1). Gözenek ölçeğinde (mikroskobik ölçek) akış özelliklerinin (hız, basınç, vb.) düzensiz olacağı açıktır. Ama yapılan deneylerde ürem miktarları çokça gözenekğin içinden geçen alanlarda ölçülür, ve bu tür ortalama aralıklı (makroskobik) miktarlar boşluğa ve süreye göre düzenli bir biçimde değıştiklerinden kuramsal işleyişe elverişlidirler.



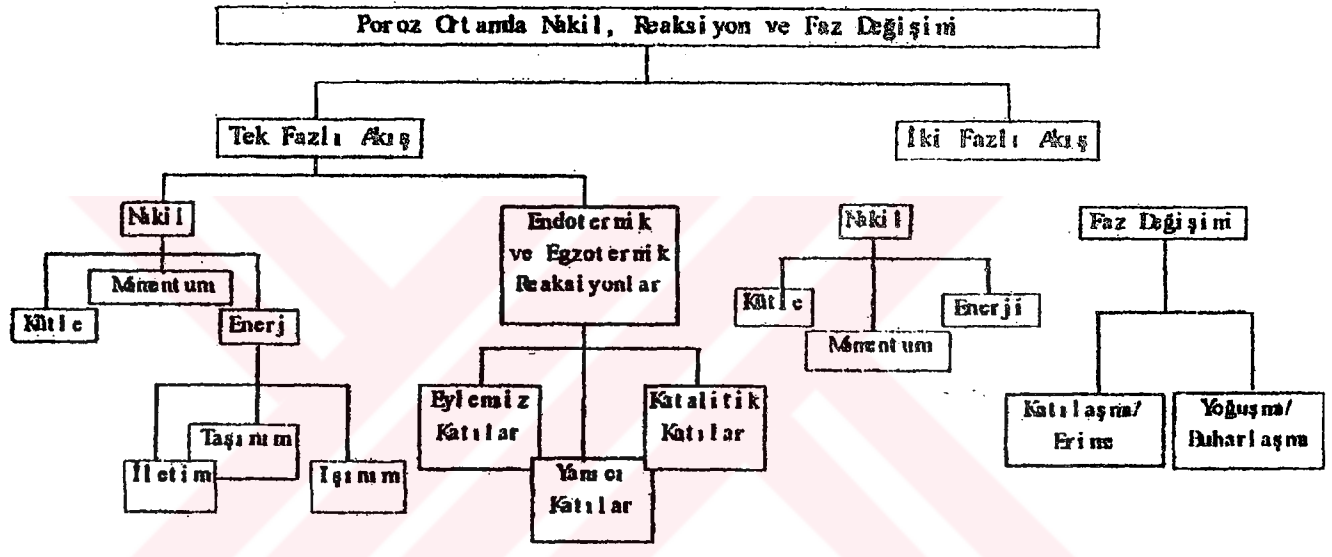
Şekil 1.1 Üstte; doğal gözenekli malzeme örnekleri: a) kumsal kumu b) kumtaşı c) kireçtaşı d) çavdar ekmeği e) odun f) insan akciğeri altta yapı endüstrisinde kullanılan taneli gözenekli malzemeler, (solda) 0.5 cm çapında liapor küreleri, ve (sağda) 1cm boyutlu parçalanmış kireçtaşı.

Gözenekli malzemeler teknik uygulamalara son derece elverişlidirler. Termik izolasyonda, otomotiv katalitik dönüştürücülerde, kimyasal katalizörlerde, nükleer reaktör yakıt çubuklarında, ısı dönüştürücülerinde, vb. , bulunurlar. Örneklersek bir reaktördeki katalizörün soğutulma ve ısıtılmasına dair hesapların yapılması, yeraltı ısı kaynaklarında ısı dağılımının

hesaplanması, dökümün katılaşma süresi ve oranı gibi hesaplamaların yapılması gözenekli malzemelerin etkin ısıl geçirgenliğine bağlıdır. İşte bu yüzden gözenekli malzemelerin etkin ısıl geçirgenliği üzerine yaygın kuramsal ve deneysel çalışmalar yapılmaktadır.

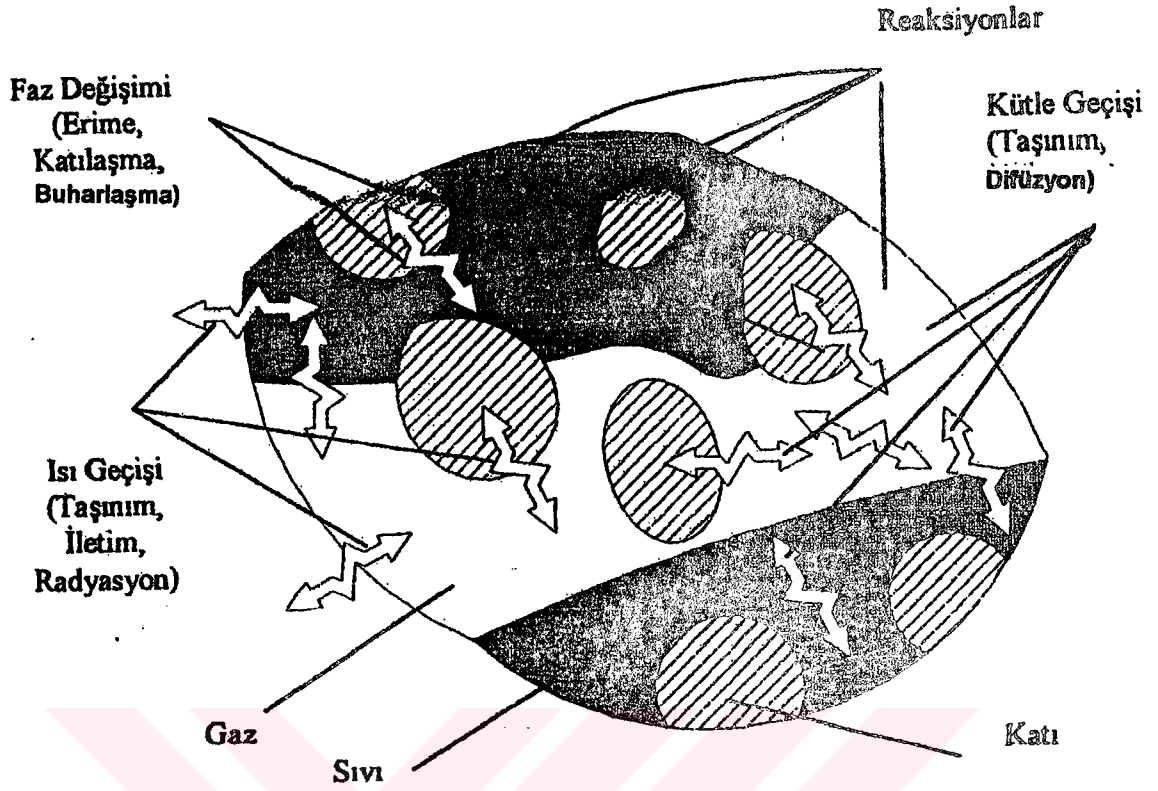
## 1.2 Por Yapısı

İstiflenmiş malzemelerde ısı aktarımının mekanizması iç dokudaki düzensizlikten dolayı karmaşıktır. Bu tür malzemelerde, ısı üç süreçte yayılır: katı fazda ısı iletimi, gözenekler arasında ısı ışınımı ve gözenekler içinde ısı taşınımı. Küçük boyutta gözeneklerin içindeki ısı taşınımı ihmal edilebilir düzeydedir.



Şekil 1.2 Gözenekli ortamda nakil, reaksiyon ve faz değişimi

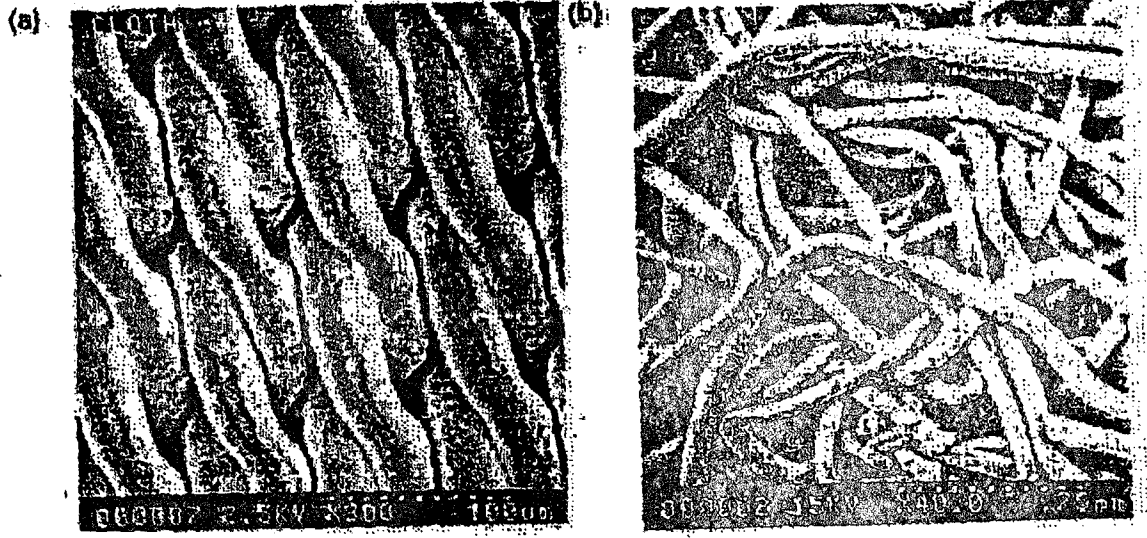
Şekil(1.2)'de tek yada iki fazlı akış olan gözenekli ortamdaki aktarım durumunun sınıflandırılması verilmektedir. Kütle, momentum ve enerjinin, kimyasal reaksiyonların (endotermik ve egzotermik) ve faz değişiminin (katı/sıvı, katı/gaz, ve sıvı/gaz) değişen, kısmi faz hacmi düzeyinde betimlenmesi ve ortalama hacim teorilerinin uygulanması çözülebilir ama, sınırlı bir betimlemeye yol açar.



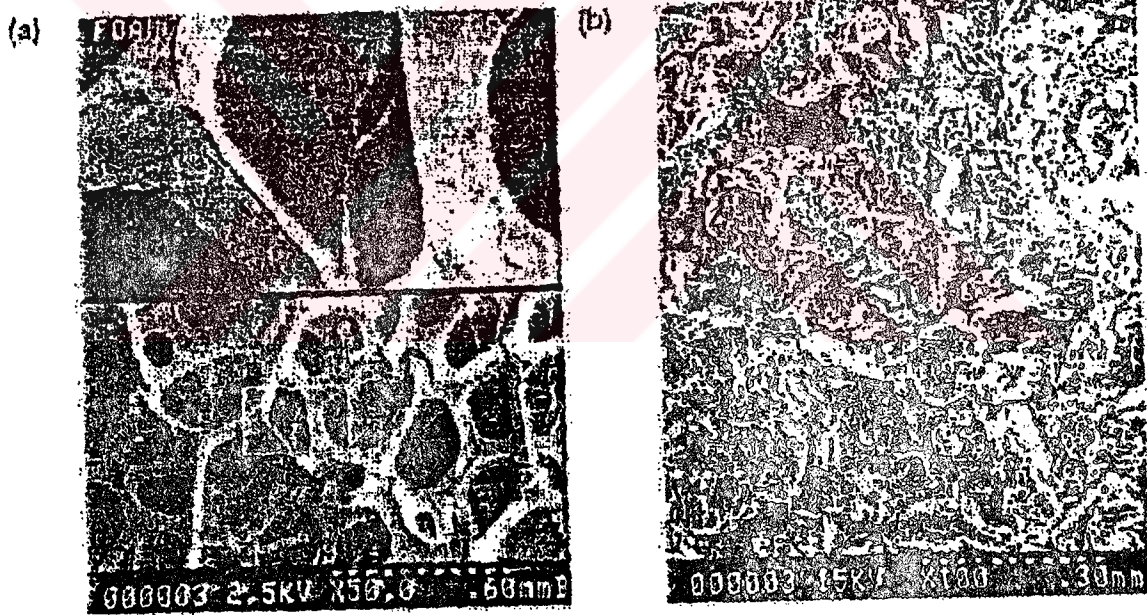
Şekil 1.3 Gözenekli ortamda por düzeyinde aktarımın, reaksiyonun ve faz değişiminin gösterilmesi

Şekil (1.3)'de seçilmiş bir por hacmi için meydana gelen ısı ve kütle geçişlerini, faz değişimlerini ve reaksiyonları görmekteyiz.

Şekil(1.4), gergin paslanmaz çelik ekranın bir elektron mikrografıdır. Bunlarla, akışla filtrelemede, kağıt makineleri vs.'de karşılaşılmaktadır. Başka bir uygulaması da Cyrogenic iletici tanklarındaki bir faz ayırıcısı olarak kullanımıdır. Şekil (1.4b)'de bir yanma odasına sıvı tedarik fitili olarak kullanılan gergin paslanmaz çelik lifler bütününün bir elektron mikroskobu görülmektedir. Şekil (1.5a), filtre ve izolasyon olarak kullanılan bir poliüretan köpüğün elektron mikrografıdır. Şekil (1.5b)'de bir kumtaşı parçasının yüzey yapısı görülmektedir. Yüzey parçacıkları, yüzey kesimleri nedeniyle içeridekilerden farklıdır.



Şekil 1. 4 Gergin paslanmaz çelik ekranın elektron mikrografi. Tel sayısı 20x1500 (her yönde inch başına tel)



Şekil 1. 5 Poliüretan köpük (a) ve bir kumtaşı parçasının (b) elektron mikrografi

Dullien por yapısını tanımlamak için, şebekenin boyutluluğu (genelde üç boyutlu), por koordinat sayısı (bir por hacmine yapılan bağlantı sayısı) ve şebekenin mikroskobik topolojisi (biçim,yapı ve bağlanabilirlik gibi parametrelerce belirlenir) gibi üç kriter vermektedir.

Basitlik sırasına göre matris:

- Çok uzun düz silindirler. En basit toprak ve anizotropik gruptan iki boyutlu yapılardadır.

- Çok uzun düz silindirler. En basit toprak ve anizotropik gruptan iki boyutlu yapılardadır. Düzlem silindirin eksenine göre paralel yada dik alınabilir. İki boyutlu por yapısına sahip olan silindirlerin herhangi çeşitli matris yapılarında (periyodik yada periyodik olmayan düzenleme, yoğun yada gevşek doldurma, aynı çizgide yada dağınık, güçlendirilmiş (yoğun) yada güçlendirilmemiş (gevşek)) incelenebilir, yani gözeneklilikte çok küçük yada çok geniş olabilir, ve parçacık boyutları da çeşitli büyüklüklerde olabilir.
- Küreler (ve başka üç boyutlu parçacıklar). İzotropik üç boyutlu por yapısı bazı durumlarda hemen analiz edilebilir. Analiz parçacık boyutunun çok çeşitli olması ve bunların tesadüfi ve de yoğun doldurulması durumlarında çok güçtür.
- Kısa ve uzun lifler. Belirli düzenlere sahip yapılar için bu anizotrop yapının analizi olanaklıdır, ama gevşek uçlu düzenlemeleri içeren yapılardaki liflerin üç boyutlu dokuması için yalnızca bazı tahmini analizler yapıla gelmiştir. Analiz lif boyutunda (çap ve uzunluk) çeşitliliği olan, doğal dokumalı yoğun doldurma için güçtür.

Kayalar, şilikon jeller, kömür, tahta plasterler, çimento, kumaşlar, biyolojik dokular, meyve ve sebzeler, gıda maddeleri, tahıllar, farmakolojik ürünler, deriler, kağıtlar, meyve ayırıcılar, vs. karmaşık topolojilere sahiptir, analiz edilmesi genelde zordur. Bu karmaşıklıklar pek çok kimseyi por yapısını araştırmaya ve parametrelerini azaltmaya yöneltmiştir, öyle ki sorun kendisini tahmini analize bırakmaktadır. Dullien çalışmasını yeniden gözden geçirmiş, ve gözenekli ortamda akış karakterlerinin anlaşılması ve yorumlanması için boru/şebeke modelleri önermiştir. Boru (kılcal kanallar) şebekesinin yalnızca modellerin durağan durumdaki tek fazlı akışların tahmininin ışığında değil, kılcal basınç doyumu eğrisinde gözlemlenen seğirme dahil, içine çekmeyle (işgal) ve kurutmayla bağlantılı iki fazlı akışlar için de incelenmesini önerir. Kılcal kanallı boru şebekesi modeli, mikroskopi yanında civa akış gözenekliimetre yöntemi (yada yüzeye çekilme/çıkarma ölçüsü) kullanarak, por hacmi dağılımının deneyle elde edilmesinin gerektiği bir çalışma öngörür.

Daha karmaşık geometriler ise kesirli geometriyle anlatılmaktadır.

### 1.3 Gözeneklilik

Bir ortamın gözenekliliği  $\epsilon$ , gözenek boşluğu tarafından kaplanan ortamın toplam hacme oranı olarak tanımlanmaktadır. Bu durumda  $1 - \epsilon$  katının (matris) kapladığı bölümdür. İzotropik bir ortam için “yüzey gözenekliliği” (örnek bir dik kesitin toplam alanının gözenek alanına bölünmesi) normalde poroziteye eşit olacaktır. Her boşluk (por), yalnızca bir pora veya birden

fazla pora bağılı olabilir, yada hiçbir pora bağılı değildir.

Birbirine bağılı porların toplam hacme oranına “etkili gözeneklilik” denir. Akış yalnızca birbirine bağılı porlar arasında olur. Yoğun olmayan ortamlarda, yani matrisi oluşturan parçacıklar gevşek doldurulmuşsa gözeneklilik etkili gözenekliliğe eşit olur. Yoğun ortamlarda ise gözeneklilik ve etkili gözeneklilik arasındaki fark ayrıntılıdır.

Katı matrisler için gözeneklilik basınç sabitinin varlığında değişmez. Yani katı matrislerde  $\partial \varepsilon / \partial p = 0$ ’dır. Deforme edilebilir matrisler için ( $\partial \varepsilon / \partial p \neq 0$ ) gözeneklilikteki değişimin boyutu yapısal özelliklere ve plastik deformasyona bağılıdır. Her boşluk (por) genelde bir por düzlemsel ölçütü “d” ile temsil edilir. Bu bir idealizasyondur, çünkü boşluk biçimi düzgün değildir. Por düzlemsel ölçütü “d” boşluğu olabildiğince yakın dolduran kürenin çapına denilmiştir. (Scheidegger, 1974)

Genelde boşluklar, kendi boyutlarında ve matrislerdeki dağılımlarında düzensizdirler. Boşluk boyunun düzensizliği ve matris yığınındaki dağılım genelde istatistiksel olarak ortalaması alınmış sınırlı hacimlerin (sapmalarla birlikte) dağılımıyla sunulur. Bu istatistiksel ortalamalar, por hacminden daha büyük, ama bütün katı matrisin hacminden daha küçük hacimlerden alınır. Bu ara hacme “örnekleyici başlangıç hacmi” denir. Bu, gözeneklilik, doyum ve kılcal basıncı gibi, istatistiksel olarak anlamlı, sınırlı ortalama özellikleriyle sonuçlanan en küçük ayırıcı hacimdir. Örnekleyici başlangıç hacmi uygun olarak seçildiğinde, porların artarak eklenmesi (ve çevrelerindeki cismin) bu sınırlı özelliklerin büyüklüğünü değiştirmez. Örneğin sıkça düzenlenen tek biçimli parçacıklardan oluşan bir matris için bu örnekleyici başlangıç hacmi yalnızca birkaç parçacık içerir. Parçacık boyutu çeşitli ve gelişigüzel düzenlenmiş başlangıç yapılarıyla katı bir matriste bu onlarca parçacık olabilir.

Çevreye yakın düzensizlikler (sınırlayan katı yada sıvı yüzeyde) çevredeki transfer oranlarında önemli bir rol oynayabilir ve anlamlı, sınırlı dağılımlarla (yani özellik yığınından başka bir biçimde) ele alınmalıdır. Örneğin, sınıra yakın kürelerin doldurma düzenlemesi yığındakilerden farklıdır. Çevre sınırı katı bir yüzeyse, bu yüzeye bitişik daha büyük gözeneklilikler akışa olan direncin azaltılmasıyla ve böylece, bu alandaki sınırlı hızın artırılmasıyla sonuçlanır. Buna “kanallama” denir ve yüzeyden çeşitli parçacık çaplarında bir uzaklıkta oluşur. Genelde kanallama örnekleyici başlangıç hacmi için öngörülerini tümüyle reddetmeyerek (yani örnekleyici başlangıç hacmiyle sınırlı gözenekliliğin anlamlı değerlerini vererek) ortalama sınırlı gözenekliliğin dağılımını kullanarak tahmin edilebilir. Yine de, kanallamanın belirlediği bölge yalnızca birkaç parçacık çapı uzunluğundaysa, sabit yaklaşımı ve sınırlı gözeneklilik uygulaması başarısız olur ve çevreye bitişik bölgedeki akışkan

(1.1)'de verilmiştir. Gözeneklilik ölçümü çeşitli tekniklerle yapılır. Bazıları gerçek gözenekliliği, bazıları da etkili gözenekliliği ölçer. Küresel parçacıkların gevşek doldurulması tek biçimli küreler için çeşitli gözeneklilikler meydana getirir. Bu gözeneklilikler küre çapından bağımsızdır. Tek biçimli küreler için en küçük gözeneklilik 0.259'luk gözenekliliği veren sıkı doldurulmuş kübik yüzey merkezli düzenleme ile elde edilir. Tek biçimli küreler gelişigüzel doldurulursa 0.38 ila 0.41 aralığında gözeneklilikler ortaya çıkar. Değişik çaplı küreler birleştirildiğinde çeşitli por yapıları ve boyutları kurgulanabilir.

Doğal ortamlar için gözeneklilik 0.6'ya aşmaz. Benzer çapta katı kürelerden oluşan tabakalar için gözeneklilik, 0.260 (yüzey merkezli istifleme) ve 0.476 (basit kübik istifleme) sınırları arasında değişir (Şekil 2.3'de istifleme şekilleri gösterilmiştir). Tane boyutundaki düzgünlük, birbirine eş tanelerin gözenekliliklerinden daha küçük gözeneklilikler oluşturma eğilimindedir. Çünkü küçük taneler büyük tanelerin oluşturduğu gözenekleri doldurmaktadır. (Scheidegger, 1974; Dullien, 1979; Bejan, 1984; Nield ve Bejan, 1992; Kaviany 1995)

Çizelge 1.1 Bazı maddelerin gözeneklilikleri (Scheidegger, 1974)

SAF MADDE	GÖZENEKLİLİK
Poliüretan Köpük	0.98
Fiberglas	0.88-0.93
Tel Kıvrımları	0.68-0.76
Silis Taneleri	0.65
Kara Barut Tozu	0.57-0.66
Deri	0.56-0.59
Taneli Katalizör	0.45
Öğütülmüş Taneli Taş	0.44-0.45
Toprak	0.43-0.54
Kum	0.37-0.50

Çizelge 1.1'nin devamı

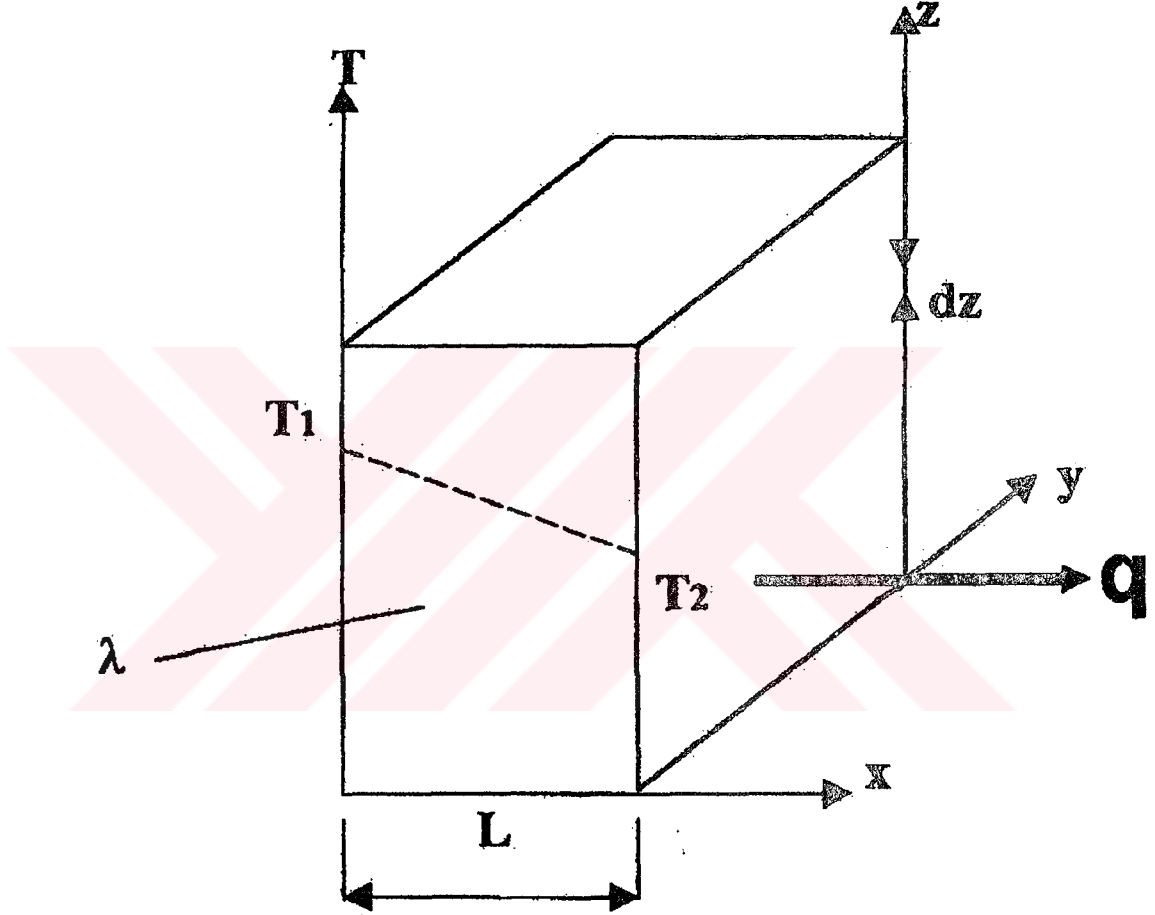
Silis Tozu	0.37-0.49
Silindirik Balata, Conta	0.36-0.43
Sigara Filtresi	0.17-0.49
Tuğla	0.12-0.34
Sıkıştırılmış , Sıcak Bakır Tozu	0.09-0.34
Kum Taşı, Petrollü Kum	0.08-0.38
Kireç Taşı	0.04-0.10
Kömür	0.02-0.12
Beton	0.02-0.07

## 2. GÖZENEKLİ ORTAMDA ISI GEÇİŞİ

Gözenekli ortamda ısı geçişi ısı iletimi, ısı taşınımı ve ısı ışınımı ile gerçekleşmektedir.

### 2.1 Isı İletimi Genel Denklemi

Kartezyen koordinatlarda bir katı cisim içinde kontrol hacmi olarak bir diferansiyel eleman alalım.



Şekil 2.1 Kartezyen koordinatlarda bir katı cisim içinde kontrol hacmi olarak alınan bir diferansiyel eleman.

Q: Sistem ve çevresi arasındaki net ısı transferi

W: Sistemden elde edilen net iş

$\Delta U$ : Sistemin iç enerjisindeki değişim

Olmak üzere kapalı bir sistem için Termodinamiğin I. Kanunu yazarsak;

$$Q - W = \Delta U$$

(2.1)

Sistemden bir net iş elde edilmiyorsa;

$$W = 0 \quad (2.2)$$

$$Q = \Delta U \quad (2.3)$$

Isı bir enerji formudur.

Termodinamiğin I. Kanunu'na göre enerji daima korunmaktadır;

$$\text{Giren Enerji} + \text{Üretilen Enerji} = \text{Çıkan Enerji} + \text{Depo Edilen Enerji} \quad (2.4)$$

$$Q_{\text{net}} = Q_{\text{giren}} - Q_{\text{çıkan}} \quad (2.5)$$

$$\text{Giren Enerji} : Q_x + Q_y + Q_z \quad (2.6)$$

$$\text{Çıkan Enerji} : Q_{x+dx} + Q_{y+dy} + Q_{z+dz} \quad (2.7)$$

Üretilen enerji, birim hacimde birim zamanda üretilen ısı miktarıdır.

$$\text{Üretilen Enerji} : q \cdot dx \cdot dy \cdot dz \quad (2.8)$$

$$Q_{x+dx} = Q_x + \left(\frac{\partial Q_x}{\partial x}\right) \cdot dx \quad (\text{Taylor açılımı}) \quad (2.9)$$

$$Q_{y+dy} = Q_y + \left(\frac{\partial Q_y}{\partial y}\right) \cdot dy \quad (2.10)$$

$$Q_{z+dz} = Q_z + \left(\frac{\partial Q_z}{\partial z}\right) \cdot dz \quad (2.11)$$

Katılarda depo edilen enerjinin zamana göre değişimi;

$$\rho \cdot c_p \cdot dx \cdot dy \cdot dz \cdot \frac{\partial T}{\partial t}$$

Denklem (2.4)'ten;

$$Q_x + Q_y + Q_z + q \cdot dx \cdot dy \cdot dz = Q_{x+dx} + Q_{y+dy} + Q_{z+dz} + \rho \cdot c_p \cdot dx \cdot dy \cdot dz \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.12)$$

$$Q_x = -\lambda \cdot dy \cdot dz \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \quad (\text{Fourier yasası}) \quad (2.13)$$

$$Q_y = -\lambda \cdot dx \cdot dz \cdot \frac{\partial T}{\partial y} \quad (2.14)$$

$$Q_z = -\lambda \cdot dx \cdot dy \cdot \frac{\partial T}{\partial z} \quad (2.15)$$

$$Q_x + Q_y + Q_z + q \cdot dx \cdot dy \cdot dz = Q_x + \left(\frac{\partial Q_x}{\partial x}\right) \cdot dx + Q_y + \left(\frac{\partial Q_y}{\partial y}\right) \cdot dy + Q_z + \left(\frac{\partial Q_z}{\partial z}\right) \cdot dz + \rho \cdot c_p \cdot dx \cdot dy \cdot dz \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.16)$$

Eşitlikte terimler sadeleşecektir;

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + q = \rho \cdot c_p \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.17)$$

$\lambda$ : Yönden bağımsızdır

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{q}{\lambda} = \frac{\rho c_p}{\lambda} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.18)$$

$$\frac{\lambda}{\rho c_p} = a$$

a: ısı difüzyon katsayısı olmak üzere

$$\nabla^2 T + \frac{q}{\lambda} = \frac{1}{a} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.19)$$

olarak Kartezyen koordinatlarda katı bir cismin zamana bağlı ısı iletim denklemini elde edilmiş olur.

### 2.1.1 Kartezyen koordinatlarda sürekli rejimde ve ısı üretimi olmayan bir sistemde tek boyutlu ısı iletimi

1. Kartezyen koordinatlar geçerlidir
2. Tek boyut geçerlidir
3. Sürekli rejim söz konusudur  $\partial T / \partial t = 0$
4. Isı üretimi yoktur  $q = 0$

Denklem (2.19) aşağıdaki hale gelir:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = 0 \quad (2.20)$$

İntegral alınır ise;

$$C_1 = dT/dx$$

$$dT = C_1 dx$$

$$T = C_1 dx + C_2$$

Sınır şartları değerlendirilirse;

$$0 \leq x \leq L$$

$$x=0 \Rightarrow T = T_1$$

$$x=L \Rightarrow T = T_2$$

$$T_1 = C_1 \cdot 0 + C_2 \Rightarrow C_2 = T_1$$

$$T_2 = C_1.L + C_2 \Rightarrow C_1 = (T_2 - T_1)/L$$

$$T = [(T_2 - T_1)/L].x + T_1 \quad (2.21)$$

$$Q_x = -\lambda.dy.dz.\partial T/\partial x$$

$$\partial T/\partial x = [(T_2 - T_1)/L]$$

$$dy.dz = A$$

$$Q_x = Q$$

Olduğundan ;

$$Q = \frac{\lambda}{L} A(T_1 - T_2) \quad (2.22)$$

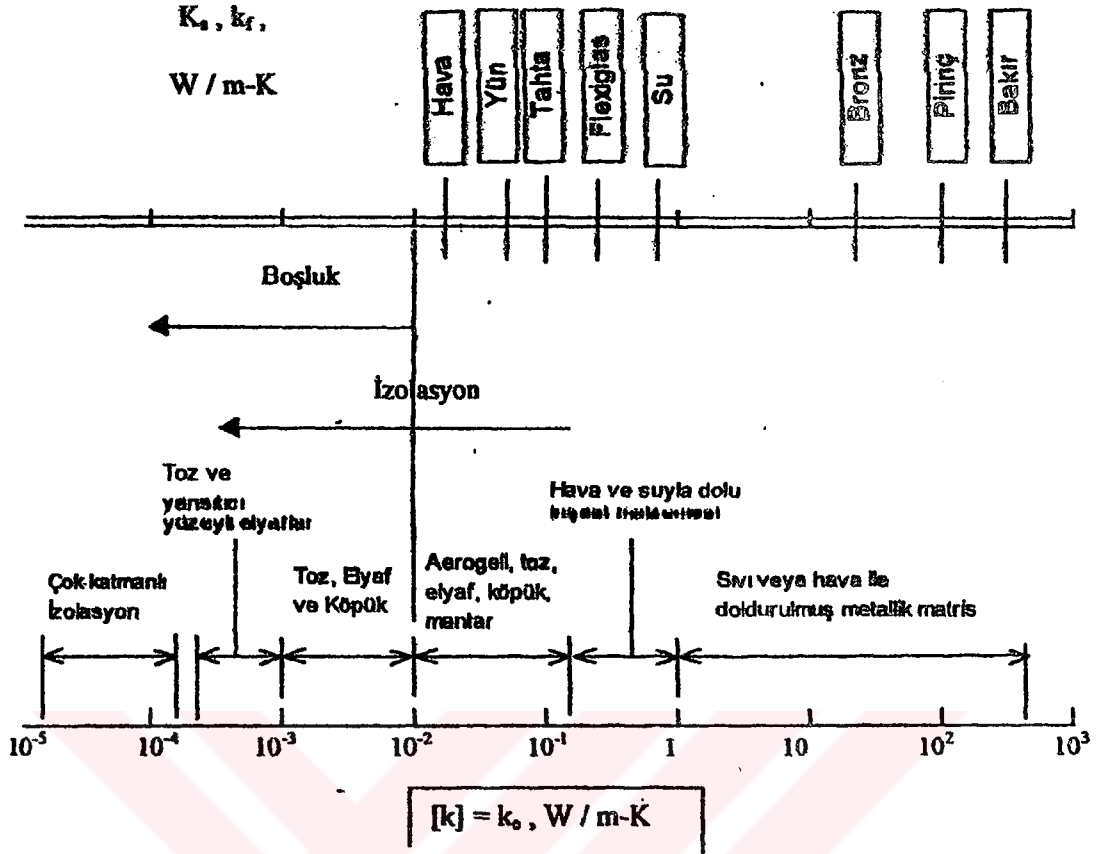
Şeklinde kartezyen koordinatlarda sürekli rejimde ve ısı üretimi olmayan bir sistemde tek boyutlu ısı iletimine ait denklem elde edilir.

### 2.1.2 Gözenekli ortamlarda etkin ısı iletim katsayısının tayin edilmesi

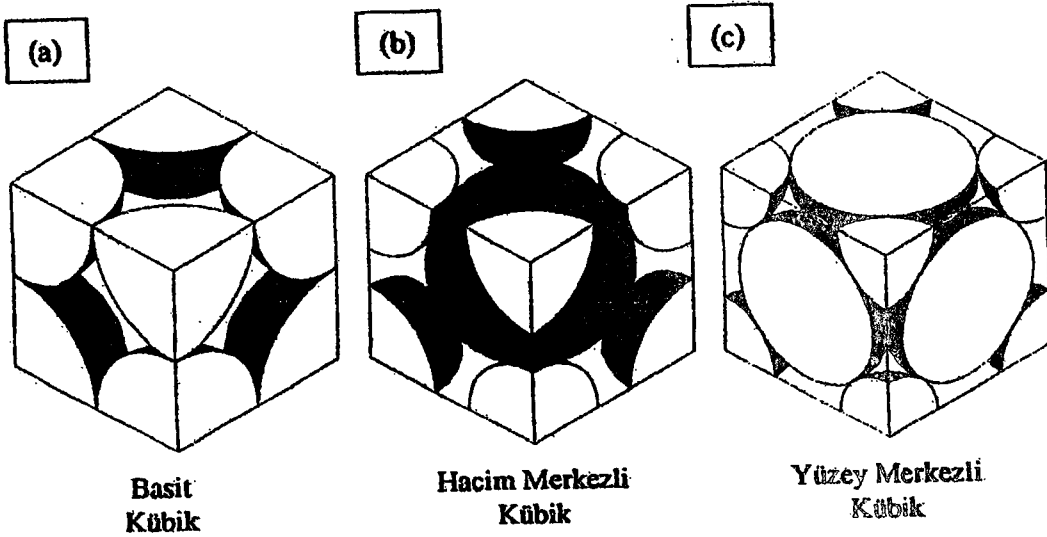
Üç boyutlu modellerin kullanıldığı  $\lambda_e$ 'nin tayininin incelenişi bu alanda alınan yolun evrimini gözler önüne serer. Analizler aşağıdaki adımlarla gelişmiştir.

- Parçacığın içinde ve çevresinde alan analiz edilip etkili iletkenlik tanımlanmıştır.
- Parçacıkların birbirine değmemesi durumuna ait analitik çözümler yapılmıştır (çok büyük yığınlar için).
- Temas eden parçacıklar için analitik-sayısal çözümler Batchelor ve O'Brien tarafından (1977) elde edilmiştir.
- Basit geometriler için homojenleştirme tekniği kullanılarak yapılan analitik çözümler Chang (1982) tarafından sunulmuştur.
- Hadley (1986) yarı ampirik bir yaklaşım edinmiştir, ve deneysel çalışmalar genelleştirilmiş bir korelasyona varmak için kullanılmıştır.

Şekil (2.2)'de, çeşitli katı matris malzemeleri (0.3 W/m.K'ye yakın  $\lambda_s$ 'si olan çok parçalılar, 2 ila 50 W/m.K'lik seramikler ve 10 ila 500 W/m.K'lik metaller) ve doyan akışkanlar (vakum dahil) kullanıldığında karşılaşılan ısı iletkenlik çeşitliliği gösterilmektedir. Genelde katı iletkenliği akışkanınkinden daha geniştir. Yine de, sıvı uygulamalarında, katının iletkenliği daha küçük olabilir. (İzolasyon örnekleri Tien ve Cunningham, Stark ve Frickle, Hrubesh ve Pekala kaynaklıdır).



Şekil 2.2 Gözenekli ortamda ısı iletkenliğinin şema üzerinde gösterimi. (oda sıcaklığında)



Şekil 2.3 Kübik bir yatağın üç türlü istiflenmesi

Çizelge 2.1 Küresel parçacıklı yatak için bazı parametreler

PARAMETRE	BASİT KÜBİK	HACİM MERKEZLİ KÜBİK	YÜZEY MERKEZLİ KÜBİK
$\varepsilon$	0.476	0.32	0.26
$N_L$	$1/2R$	$3^{1/2}/2R$	$(3/8)^{1/2}/R$
$N_A$	$1/4R^2$	$3/16R^2$	$1/2(3)^{1/2}R^2$
$N$	1	0.48	1/3
$S_F$	1	$3^{1/2}/4$	$1/6^{1/2}$
Toplam değme noktası	6	8	12
Isı analizinde kullanılan noktalar	2	8	6

Parçacıkların sıkıştırılan bir yüke maruz kaldığı durumda (ki nedeni bir bakıma parçacıkların kendi ağırlığıdır) küresel parçacıkların oluşturduğu yataklar için etkili ısı iletkenliğini tayin etmek amacıyla alansal bağlantı ilave edilmelidir. Yüzey pürüzlülüğünün (ek bağlantı direnci) ve yüzeylerdeki kaplama varlığının etkisi dışında, sorun yoğun doldurulmuş parçacıklarla ilgilenebilir. Burada, bağlantı alanı parçacıkların elastik deformasyonu için tayin edilebilir. Chen ve Tien, Ogniewicz ve Yovanovich, Batchelor ve O'Brien küresel parçacıkların sıkça düzenlenmesinden oluşan sistemler için iletken ısı akışını analiz etmişlerdir.

$\lambda_f=0$  (vakum) olduğunda, Chen ve Tien basit kübik, yüzey merkezli kübik ve hacim merkezli kübik sıkı doldurulmuş düzenlemeler için iletken ısı akışını analiz etmiştir. Her katmanın ısı akışı yönüne normal olarak izotermal olduğu varsaymışlardır.

Matrisin tüm iletkenliği (2.23) olarak verilmiştir.

$$\frac{k_e}{k_s} = \left[ 3(1 - \mu_p^2)FR \right]^{1/3} \frac{1}{0.513 S} \left[ \frac{N_A}{N_L} \right] \quad (2.23)$$

Burada  $N_A$  ve  $N_L$  sırasıyla birim alan ve uzunluk başına parçacık sayısıdır.  $S$ ,  $N_A$  ve  $N_L$  sabitleri, üç sıkı doldurulmuş düzenleme için Çizelge (2.1)'de verilmiştir. Düzenlemeler Şekil (2.3)'de gösterilmektedir.  $F$  faktörü, dış basınç  $P$  ile Çizelge (2.1)'de verilen  $S_F$  değerlerine bağlıdır.

$$F = \frac{PS_F}{N_A} \quad (2.24)$$

Çok fazlı bir malzemenin toplam ısı iletkenliği, her fazın ısı iletkenliğine, fazların bölümlerine, fazların dağılım yöntemine bağlıdır. Fazların dağılımı boyutlarını, biçimlerini, yönelimlerini, ısı akış yönüne göre sürekliliklerini ve gözenekteki gaz basıncını içerir. Etkin ısı iletkenliğin ön belirlemesi için kuramsal çalışmalara dayanan çok sayıda denklem vardır. Çizelge (2.2)'de bu konuda yapılmış çalışmaların bazı modeller için sonuçları gösterilmektedir. (Kakaç vd.,1991; Kaviani,1995)



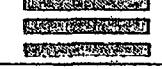










Maxwell'in denklemi (Çizelge(2.2)'de kutu1) sürekli ortamda katı kürelerin rasgele dağılımındaki ısı iletkenliği içindir. Bu denklem, katı kürelerin birbirinden yeterince uzak olduğu ve bu yüzden karşılıklı olarak birbirlerini etkilemediği varsayımıyla türetildiğinden dolayı yalnızca boşluk oranı  $p$  büyük olduğu zaman uygulanabilir (Maxwell, 1904)

de Vries (kutu 2) Maxwell'in denklemini iki fazlı bir sisteme göre genişletmiştir.(Çizelge(2.2) de kutu 2).  $F$  etkeni, sürekli ve dağılmış fazlarda ortalama sıcaklık değişim ölçülerinin oranını temsil eder.  $g_i$  etkenleri, parçacık boyutu etkenleridir. Küresel parçacıklar için denklem Maxwell'in denklemine dönüşür. ( $g_i = g_1 = g_2 = g_3 = 1/3$ ). (de Vries, 1952)

Krischer ve Kröll, iki fazlı bir sistemin ısı iletkenliğinin en yüksek ve düşük düzeylerinin araştırılmasının yararına dikkat çekmiştir. Örneğin katı-gaz sistemindeki gibi; ki termik iletkenlik değerleri  $\lambda_s/\lambda_f = 1000$  için  $2.5 < \lambda_s/\lambda_f < 600$  arasındadır. Belirli boşluk oranına sahip, malzeme oranı fazla olan, yüksek değerlerdeki  $\lambda_s/\lambda_f$  için düzenlenen, iki fazlı bir sistemin maksimum etkin termik iletkenliği malzeme kısmı ısı akım yönüne paralel düzlemler tarafından ayrılan alternatif katmanlar şeklinde düzenlenirse elde edilir(Çizelge 2.2, kutu 3).

Böyle bir sistemin minimum etkin termik iletkenliği ise malzeme kısmı normal ısı akım yönüne gelecek şekilde düzenlenirse elde edilir (Çizelge 2.2, kutu 4). Çeşitli boşluk oranları da uygulanmıştır.  $\varepsilon = 0.4$  ve  $\lambda_s/\lambda_f = 2$  olduğunda ortalama değerlerin hemen hemen  $\pm 7\%$ 'sine karşılık gelen  $1.43 < \lambda_s/\lambda_f < 1.60$  değerleri bulunmuştur.

Çizelge 2.2 Etkin ısı iletkenliği hakkında yapılmış çalışmalar

NO	ARASTIRMACI	MODEL	BAGINTI
1	Maxwell (1904)		$\frac{k_s}{k_f} = \frac{2\varepsilon + (3-2\varepsilon)k_s/k_f}{(3-\varepsilon) + \varepsilon k_s/k_f}$
2	de Vries (1952)		$\frac{k_s}{k_f} = \frac{+(1-\varepsilon)F k_s/k_f}{\varepsilon + (1-\varepsilon)F}, F = \frac{1}{3} \sum \frac{1}{1+(k_s/k_f-1)g}$
3			$\frac{k_s}{k_f} = \varepsilon + (1-\varepsilon)k_s/k_f$
4	Krischer ve Kröll (1956)		$\frac{k_s}{k_f} = \frac{1}{\varepsilon + (1-\varepsilon)k_s/k_f}$
5			$\frac{k_s}{k_f} = \frac{1}{(1-\alpha)k_f/k_{s,1} + \alpha k_f/k_{s,2}}$
6	Yagi ve Kunii (1957)		$\frac{k_s}{k_f} = \frac{1-\varepsilon}{k_f/k_s + \varphi}, \varphi = f\left(\frac{k_f}{k_s}, \varepsilon\right)$
7	Kunii ve Smith (1960)		$\frac{k_s}{k_f} = \varepsilon + \frac{\beta(1-\varepsilon)}{\Phi + \gamma k_f/k_s}$
8	Schfönder (1958)	Küreler 	$\frac{k_s}{k_f} = \frac{2}{1-k_f/k_s} \left[ \frac{\ln(k_s/k_f)}{1-k_f/k_s} - 1 \right]$
	Zehner ve Schlönder (1970)		$\frac{k_s}{k_f} = 1 - \sqrt{1-\varepsilon} + \sqrt{1-\varepsilon} \frac{2}{\varnothing} \left[ \frac{\varnothing_1 g \ln(k_s/k_f)}{\varnothing^2} - \frac{g+1}{2} - \frac{g-1}{\varnothing} \right]$ $\varnothing_1 = 1 - k_f/k_s g, \varnothing = 1 - k_f/k_s, k_s^\infty = k_s/k_f$
10	Woodside ve Messner (1969)	Küreler 	$\frac{k_s}{k_f} = \frac{\alpha(\alpha^2-1)}{\ln\left(\frac{\alpha+1}{\alpha-1}\right)}, \alpha = \left[ 1 + \frac{4}{\Pi(k_s/k_f)} \right]^{1/2}$
11	Delester ve Boegli (1958)		Sayısal hesaplama ve grafiksel
12	Wakuo ve Kato (1969)		
13	Krupiczka (1967)	Silindirler 	$\frac{k_s}{k_f} = \left[ \frac{k_s}{k_f} \right]^{A \cdot B \cdot I \cdot g(k_s/k_f)}, A = f(\varepsilon)$

Deneysel çalışmalarına dayanarak Krischer, malzemelerin bir bölümünün ısı akış yönüne paralel, bir bölümünün de dik düzenlendiği bir model önerir (Çizelge 2.2, kutu 5). (Krischer ve Kröll, 1957)

Yagi ve Kunii basitleştirilmiş geometrik bir model üstünde durmuştur. Bu modele göre ısının bir bölümü yalnızca katı tarafından, bir bölümü akışkan tarafından ve geri kalanı bir katman

katı bir katman akışkan içeren çok katmanlı bir sistem tarafından iletilir (Çizelge 2.2, kutu 6). (Yagi ve Kunii, 1957)

Kunii ve Smith küreler içeren bir birim hücreye dayalı bir denklem önermişlerdir. Boşluk oranına ve katı ve akışkan fazlarının termik iletkenliğine ek olarak, katı parçacıkların dağılımı sıcaklığı ve çapı, radyasyonu belirleyebilmek için denkleme alınmıştır. Sıcaklık çok yüksek olmadığı zaman radyasyonla ısı transferinin etkisi kaybolur ve basit bir bağıntı (Çizelge 2.2, kutu 7) elde edilir. Parçacık boyutuna, parçacıkların düzenlenmesine ve boşluk oranına bağlı olan üç parametre ( $\beta, \gamma, \phi$ ) vardır.  $\beta$ , parçacık çapı doğrultusundaki iki komşu katı parçacığın merkezleri arasındaki etkin uzunluğun oranını,  $\gamma$ , parçacık çapına ısı aktarımı için bir katı parçacığın etkin uzunluğunun oranını temsil eder. Kürelerin sık dağılımı için şu parametreler örnek verilebilir:  $\beta = 0.9$  ve  $\gamma = 2/3$ . En gevşek ve açık dizimde de  $\beta = 1$  olmalıdır. Değerlendirilmesi en güç değer  $\phi$ 'dir. Bu, iki katı parçacığın değme yüzeyine bitişik sıvı filmin etkin kalınlığının ölçüsüdür. (Kunii ve Smith, 1960)

Zehner ve Schlünder (Çizelge 2.2, kutu 9), iletim yönünde rastlantısal bir dışbükey çizgi ve nokta kontaktları varsayan bir birim hücreye dayalı bir model sunarlar. Parçacık şeklinin etkisi boşluk oranına bağlı olan aşağıdaki faktör yoluyla ele alınır. (Zehner ve Schlünder, 1970)

$$g = B \left[ \frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon} \right]^{10/9}$$

Parçacık şekil faktörü	B
Küre için	1.25
Kırılmış parçalar için	1.40
Silindir ve yüzük için	2.50

Birçok araştırmacı gözenekli malzemelerin etkin ısı iletkenliği için çok sayıda çözüm sunmaktadır. Deissler ve Boegli (Çizelge 2.2, kutu 11),  $\varepsilon = 0.476$  ile kübik bir küreler örgüsü için gevşetme yöntemiyle Laplace denkleminde çok sayıda çözüm elde etmiştir. (Deissler ve Boegli, 1958)

Wakao ve Kato (Çizelge 2.2, kutu 12) dengeli düzenlenmiş küreler için bileşik iletim ve radyasyon ısı transfer denklemini çözmek için gevşetme yöntemini kullanmıştır. Kübik  $\varepsilon = 0.476$  ve Ortorombik  $\varepsilon = 0.395$  durumlar için hesaplanmış sonuçları grafikte sunmuşlardır. (Wakao ve Kato, 1969)

Krupiczka (Çizelge 2.2, kutu 13), bir silindir demeti içindeki ısı iletimine ve  $\varepsilon = 0.215$  ve kübik küreler örgüsü içindeki ısı iletimine yaklaşık bir çözüm üretmiştir.

Örneğin;  $0.215 \leq \epsilon \leq 0.476$  :  $A = 0.282 - 0.757 \log \epsilon$ ,  $B = - 0.057$ . (Krupiczka, 1967)

Chen ve Churchill, yüksek sıcaklıktaki istiflenmiş tabakalarda radyasyonla ısı transferini araştırmıştır. (Chen ve Churchill, 1963)

Wakao ve Vortmayer istiflenmiş tabakaların efektif ısı iletkenliğine basıncın etkisini araştırmışlardır. (Wakao ve Vortmayer, 1971)

### 3. DENEYSEL ÇALIŞMALARA HAZIRLIK

Gözenekliliğin ısı iletim katsayısına etkisini belirlemek için yapılacak deneysel çalışmalar 2 temel ölçümü içermelidir. Bunlar, numunelerin gözenekliliklerin tespiti ve ısı iletim katsayılarının ölçülmesidir.

#### 3.1 Isı İletim Katsayısının Ölçülmesi

Isı iletim katsayısının ölçülmesi için 2 temel metot kullanılır. Bunların birincisi sürekli rejim metodudur. Numuneler bir sıcaklık gradyeni maruz bırakılır. Numunelerdeki sıcaklık kararlı hale geldiğinde sıcaklık gradyenini sağlamak için gerekli olan enerji kullanılarak ısı iletkenlik kartezyen koordinatlarda sürekli rejimde ve ısı üretimi olmayan bir sistemde tek boyutlu ısı iletimi denklemi yardımıyla hesaplanır.

$$\lambda = \frac{Q \Delta X}{A \Delta T} \quad (3.1)$$

Burada Q elektrik enerjisi girdisi (W), A numunenin ısı akısına dik kesit alanı ( $m^2$ ),  $\Delta X$  numunenin ısı akısı doğrultusundaki uzunluğu,  $\Delta T$  numunenin maruz kaldığı sıcaklık gradyenidir. Bu metot yaygın olan ısı iletim katsayısı ölçme yöntemidir ancak özellikle toprağın ısı iletkenliğine dair yapılan çalışmalarda bu yöntemin sürekli rejim durumuna gelinceye kadar geçen uzun zaman zarfında sıcak kısımlarda kuruma, soğuk kısımlarda ise su veya buzun toplanması gibi bir dezavantaj içerdiği gözlemlenmiştir. Ve oluşan nem hareketi hatalı ısı iletkenlik ölçümlerine neden olmuştur. Dolayısıyla toprağın ısı iletkenliği konusunda çalışan araştırmalardan sadece Kersten bu metodu kullanmıştır (Kersten, 1949). Kapalı boşlukların hakim olduğu yalıtım malzemeleri üzerinde yapılan çalışmalarda ise bu metotta ısrar edilmiştir. Bunun sebebinin yöntemin ilk yöntemden maliyetinin yüksek olması yanında kapalı boşluklarda nem hareketinin ortaya çıkmayacağı düşünülmesi olsa gerek. Yada ısı probunun plaka numunelere yerleştirilişi üzerinde bir çalışma yapılmamıştır ki bu prob yumuşak malzemelere (toprak gibi) kolay yerleştirilirken sert plakalara (örneğin beton) güç yerleştirilir. Bir olasılık ta ülkemizdeki ilgili standardın (TS 388/Nisan 1977) 1977 yılından sonra yeniden revizyondan geçmemesindedir. Çünkü diğer yöntem olan ve daha iyi

sonuçlar veren süreksiz rejimde test tekniği Penner'ın 1975'teki çalışmasından sonra özellikle toprağın ısı iletkenliğini ölçmek için vazgeçilmez olmuştur.

Bu metot numuneye ince ısı probu yerleştirilmesiyle gerçekleştirilir. İğneye sabit elektrik gücü verilerek zaman içerisindeki sıcaklık değişimleri hesaplanır. Numunenin ısı iletkenliği aşağıdaki denklem kullanılarak hesaplanabilir.

$$\lambda = \frac{q_i}{4\pi \Delta T} \ln(t_2 / t_1) \quad (3.2)$$

Burada  $q_i$  iğnenin birim boyuna verilen elektrik enerjisi girdisi,  $\Delta T$ ,  $t_1$ -  $t_2$  zaman aralığındaki sıcaklık değişimini ifade eder. Daha az test süresine ihtiyaç duyulması sebebiyle süreksiz rejim test tekniği nem hareketlerine daha dayanıklıdır. Ayrıca iğne ve toprak arasında daha iyi temas olmasından dolayı sürekli rejim testlerinden daha kesin sonuç verir (Penner et al.,1975; Salomone et al.,1984; Salomone and Kovacs,1984; Salomone and Marlowe, 1989; Farouki 1986).

### 3.1.1 Bu çalışmada ısı iletim katsayısını ölçmede kullanılan metot

Isı iletim katsayısını ölçmek için hazırlanan deney seti sürekli rejimde ölçüm metoduna dayanmaktadır. Bunun nedeni laboratuvarımızda gerekli altyapının mevcut oluşudur.

Deney setinin kuruluş aşamasındaki altyapı laboratuvarımızda kurulu bir soğuk oda sisteminin bulunması oldu. Ayrıca bu soğuk odaya bitişik bir oda daha mevcuttu ve buranın da sıcak oda olarak tasarlanması ve kontrollü olarak sıcak odadan soğuk odaya ısı transferi sağlanması kolay oldu. Sonra numunenin konulacağı bölüm oluşturuldu. Bu özel bir bölme olarak tasarlandı çünkü bu bölme içinde numuneye verilecek elektrik gücü numunenin bir sıcaklık gradyanına maruz kalmasını sağlamalı, ayrıca numune kararlı hale geldiğinde sıcaklık gradyanını sağlamak için gerekli enerji tam olarak ölçülebilmeliydi. Bunun için bu bölmenin çok iyi izole edilmiş bir bölme olmasına, ayrıca bu bölümden ısıtıcıdan verilen elektrik gücünün sadece numune üzerinden soğuk odaya geçen ısı akısını karşılaması gerektiğine karar verildi.

Sıcak ve soğuk oda arasındaki yitong duvarı yıkarak yaklaşık 1.2x1.2 m ebatlarında bir pencere açıldı ve pencere kenarlarını tıraşlatarak düzeltildi. MDF'den 1x1x0.5 m ebatlarında bir sandık yaptırıldı. Sandığın içinde 0.75x0.75x0.50 m ebatlarında MDF parçalarla dış sandığa montajlanmış bir iç sandık mevcuttu. Bunu yaparken amaç iki sandığın arasında oluşan hacmi poliüretan köpükle doldurarak izolasyon yapılmasıydı. Ayrıca pencereye

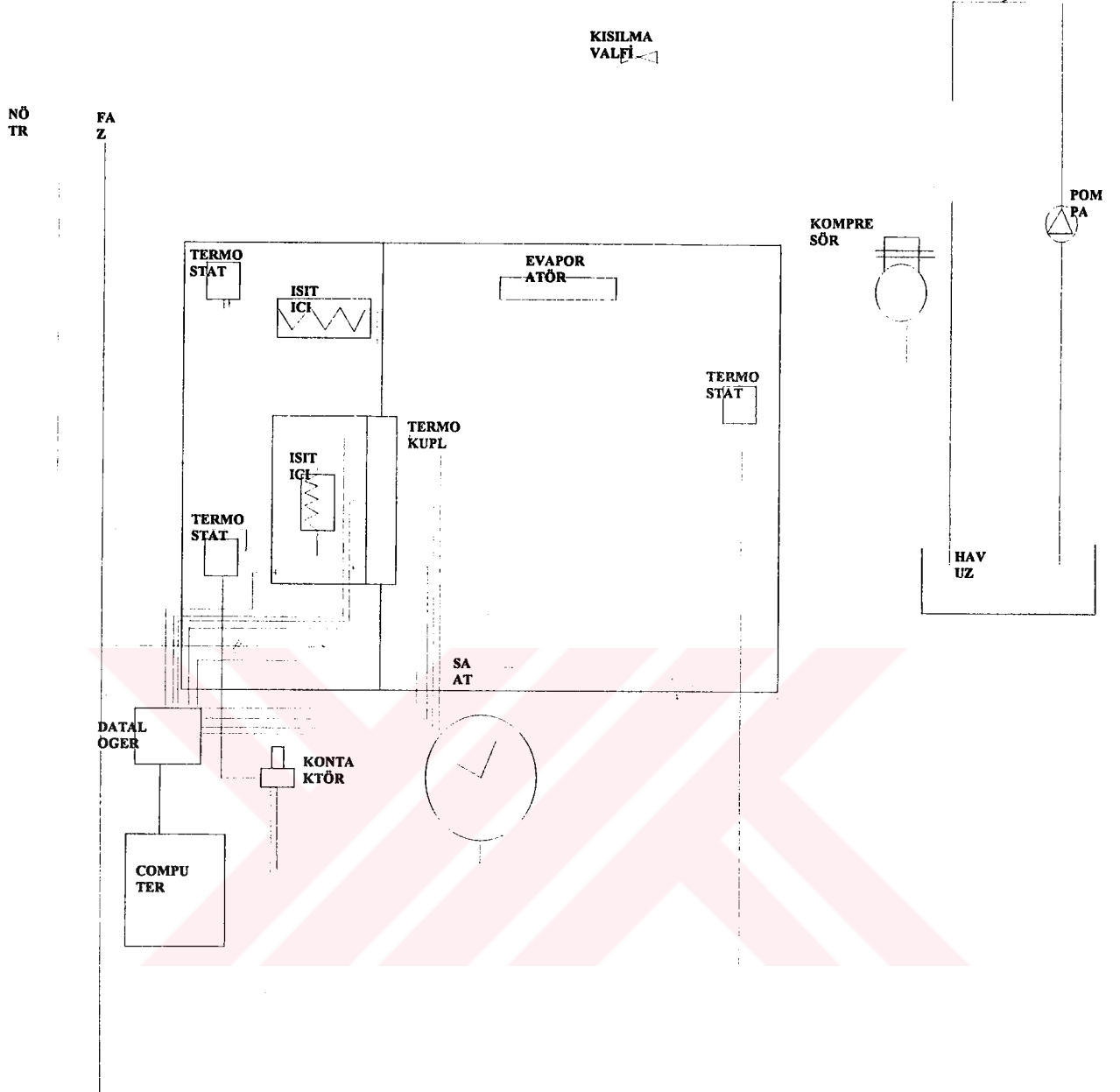
sistemin rejime girmesi diyoruz. Sistem rejime girdikten sonra saat sıfırlandı. Bu saat sadece iç odadaki ısıtıcı çalışırken çalışıyor durduğunda ise duruyordu. İç odadaki ısıtıcının devreye giriş ve çıkışını ise elektronik termostatın ayar değeri kontrol ediyordu. Şöyle ki iç odadaki sıcaklık ayar değerini geçince ısıtıcı durmakta, ayar değerinin altındayken çalışmaktaydı.



Şekil 3.2 Deney düzeneğinin sıcak oda tarafından çekilmiş bir görüntüsü



Şekil 3.3 Deney düzeneğinin soğuk oda tarafından çekilmiş bir görüntüsü



Şekil 3.4 Deney düzeneğinin şeması

Böylelikle diyebiliriz ki sistem rejime girdikten sonra sıfırladığımız saatte gözükten süre bize numuneyi oluşan kararlı sıcaklık gradyeninde tutmak için harcadığımız elektrik gücünü bulmak için gerekiyordu. İşte saatin bu şekilde çalışmasını bir kontaktör bağlantısı yardımıyla sağlandı.

Sonra veri toplama sistemini kuruldu. Veri toplamak için K tipi termokupllar, dataloger (veri toplayıcı) ve logv57 programını kullanıldı. Termokupllar bölüm 3.4’de anlatıldığı gibi kalibre edildi.

### 3.1.2 Deneyin yapılışı

Deneyi yaparken her numune için yapılması gereken başlıca işlemler numunelerin boyutlarının ölçülmesi ve yerine yerleştirdikten sonra çevresinin poliüretan köpükle izole edilmesidir.

Sonra termokupllar bağlanır. Bu sistem de kalibre edilmiş 9 termokupl mevcuttur. Bu termokuplların 6 tanesi numunenin yüzeyindeki sıcaklıkları ölçmektedir. Bunların üçü sıcak yüzde üçü soğuk yüzde yer almaktadır. Diğer 3 tanesi ise sıcak, soğuk ve iç odaların sıcaklıklarını ölçmek içindir. Bunlar aşağıdaki şekilde numaralanmıştır:

TC1: İç oda sıcaklığını

TC2: Soğuk yüzey sıcaklığını

TC3: Soğuk yüzey sıcaklığını

TC4: Soğuk oda sıcaklığını

TC5: Sıcak yüzey sıcaklığını

TC6: Sıcak yüzey sıcaklığını

TC7: Soğuk yüzey sıcaklığını

TC8: Sıcak oda sıcaklığını

TC9: Sıcak yüzey sıcaklığını ölçmektedir.

TC2- TC9, TC3 -TC6, TC7- TC5 termokupl çiftleri birbirlerinin karşısına gelen termokupl çiftleridir. Deneyler sırasında 12 dakikada bir değer alınarak bilgisayara kaydedilmiştir. Termokupllardan alınan sıcaklık değerleriyle zamana bağlı sıcaklık değişimi grafikleri çizilmiştir. Sistemin kararlı hale gelişi bu grafiklerde görülebilmektedir. Daha sonra aşağıdaki denklem kullanılarak numunenin ısı iletim katsayısı bulunmuştur.

$$\lambda = \frac{t Q \Delta X}{T A \Delta T} \quad (3.3)$$

Burada t saatin (iç odadaki ısıtıcının) kararlı rejim halinde iken çalıştığı süre, sistem kararlı rejim haline gelip saat sıfırlandıktan sonra deneyin bitişine kadar geçen toplam süredir. Diğer terimler denklem (3.1)' dekinin aynısıdır.

## 3.2 Numunelerin Hazırlanması

### 3.2.1 Suni gözenekli ortam oluşturulması

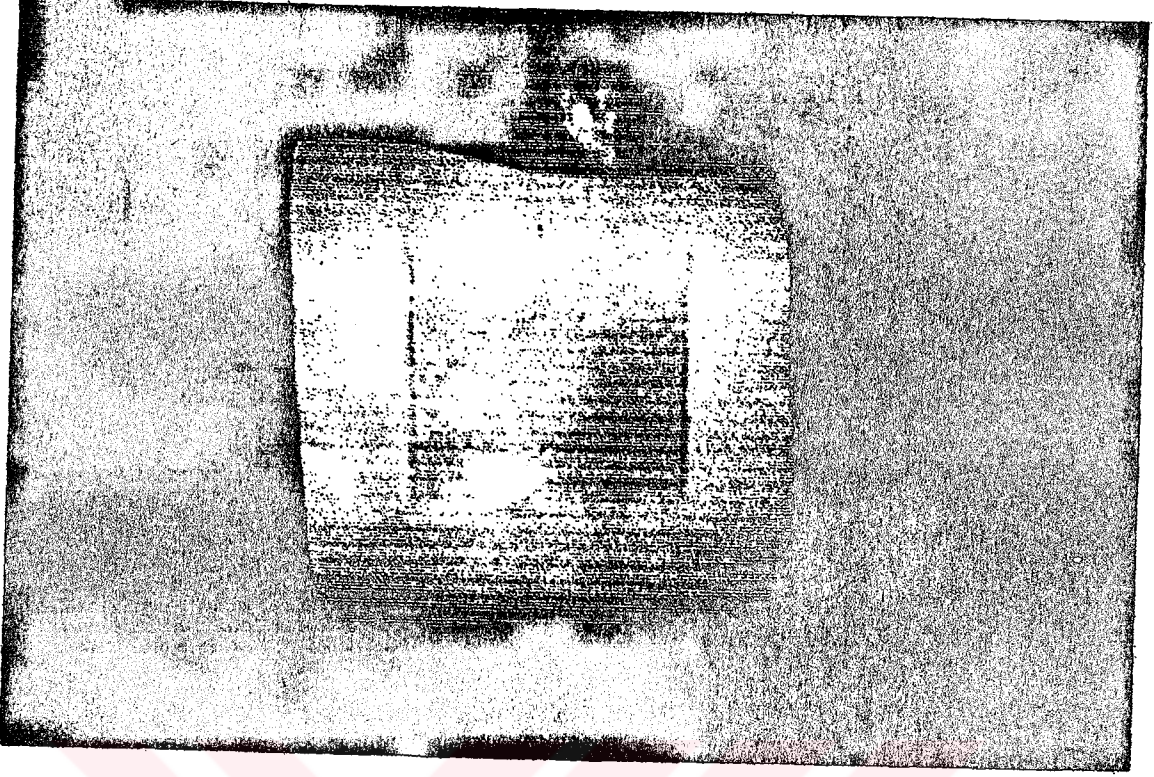
Gözenekli ortamlarda ısı ve kütle transferi ile ilgili yapılan bir çok deneysel çalışma vardır.

Bunların çoğunluğu ısı taşınımı üzerine yapılmış araştırmalardır. Isı iletimiyle ilgili olanları ise özetle bölüm 2 de anlatılmıştır. Ne olursa olsun tüm çalışmalarda en çok ilgi çeken husus gözenekli ortamların suni olarak oluşturulmasıdır. Bunun başlıca sebebi gözenekliliğin tespitinde ortaya çıkan zorlukları düzenli bir geometri üzerine kurulu fiziksel modeller kurarak yok etme düşüncesidir. Bu düşünceden hareketle bu çalışma için suni bir fiziksel model tasarlandı. Bunun için 400x400x0.5 mm ebatlarında bir alüminyum levha alındı ve üzerinin 3mm çaplı kristal polistren boncuklarla kaplanması tasarlandı. Boncukları olabildiğince sık dizerek aralarında kalan havanın hareketine olanak vermeyecek büyüklükte boşlukların oluşturulması düşünüldü. Böylelikle suni bir gözenekli ortam oluşacaktı ve bu ortamın gözenekliliği kolayca bulunabilecekti.



Şekil 3.5 Polistren boncukların alüminyum levhaya dizilişi

Oluşan bu tek kat levhayı ölçüldükten sonra 2. , 3., 4., ve 5., katları aynı şekilde oluşturup ölçülecekti. Her katta farklı bir gözeneklilik elde edilmesi umuluyordu. Ancak boncukları dizme işlemini kolayca yapılabilmesi için katlar arasında naylon gerildiğinden dolayı her kat birbirinden kesin bir şekilde ayrılmış oldu ve boncukların mümkün olduğunca sıkı dizilmesi katlar arasında belirgin bir gözeneklilik farkının oluşmamasına yol açtı. Dolayısıyla bu levhadan geniş bir gözeneklilik aralığı için ısı iletim katsayısı değerleri elde edilemedi.



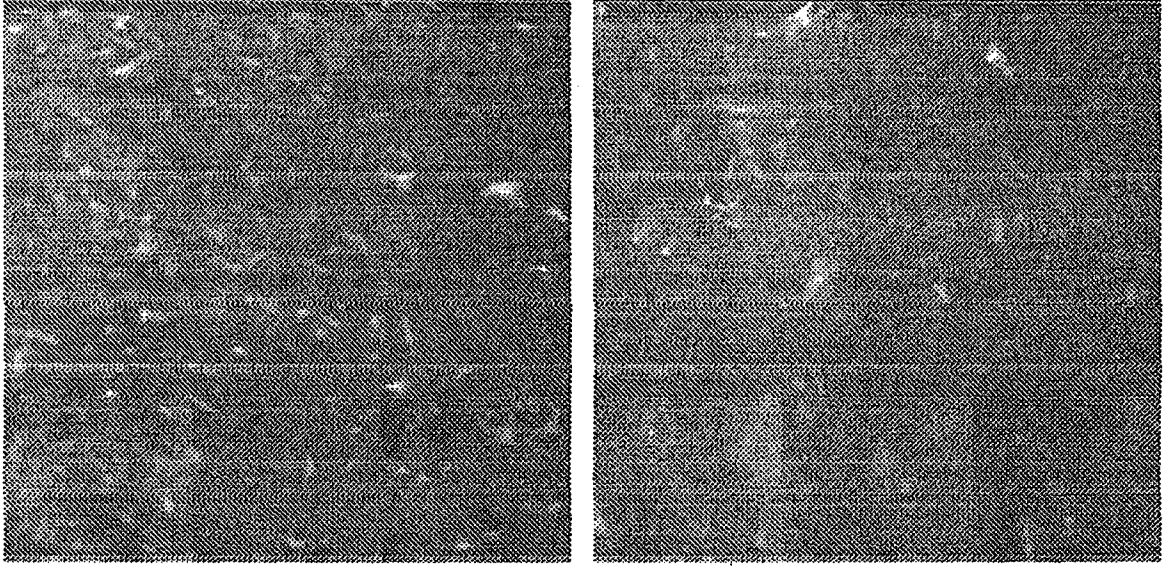
Şekil 3.6 Numune plakının poliüretan köpükten bir çerçeveye yerleştirilerek çevresinin yalıtılması.

### 3.2.2 Piyasadan Alınan Sert Polistren Köpük Numuneler

Piyasada yalıtım malzemesi olarak satılmakta olan sert polistren köpük numuneler alındı . Bunların fiziksel özellikleri aşağıdaki gibidir.

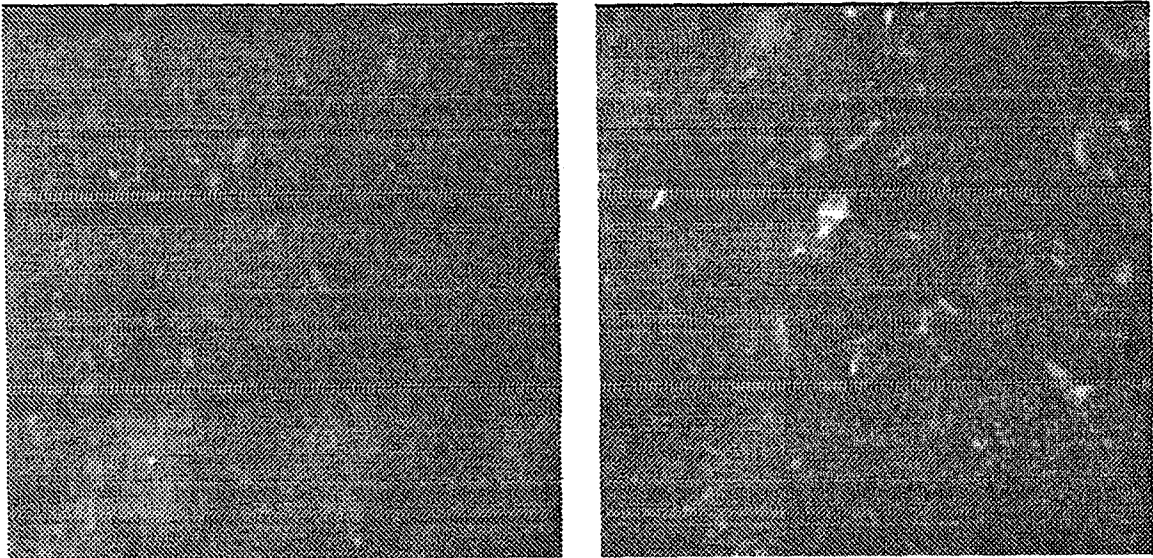
Çizelge 3.1 Sert polistren köpük numunelerin numaraları ve boyutları

parça	x(cm)	y(cm)	z(cm)	ağırlık(gr)	hacim(cm <sup>3</sup> )	ısı alanı(m <sup>2</sup> )	yoğunluk(kg/m <sup>3</sup> )
A	39,9	39,9	3	140,1	4776,03	0,159	0,029
B	40,1	40,1	5	340,5	8040,05	0,161	0,042
E	39,9	39,9	3	177	4776,03	0,159	0,037
F	39,9	39,9	3	137,2	4776,03	0,159	0,029



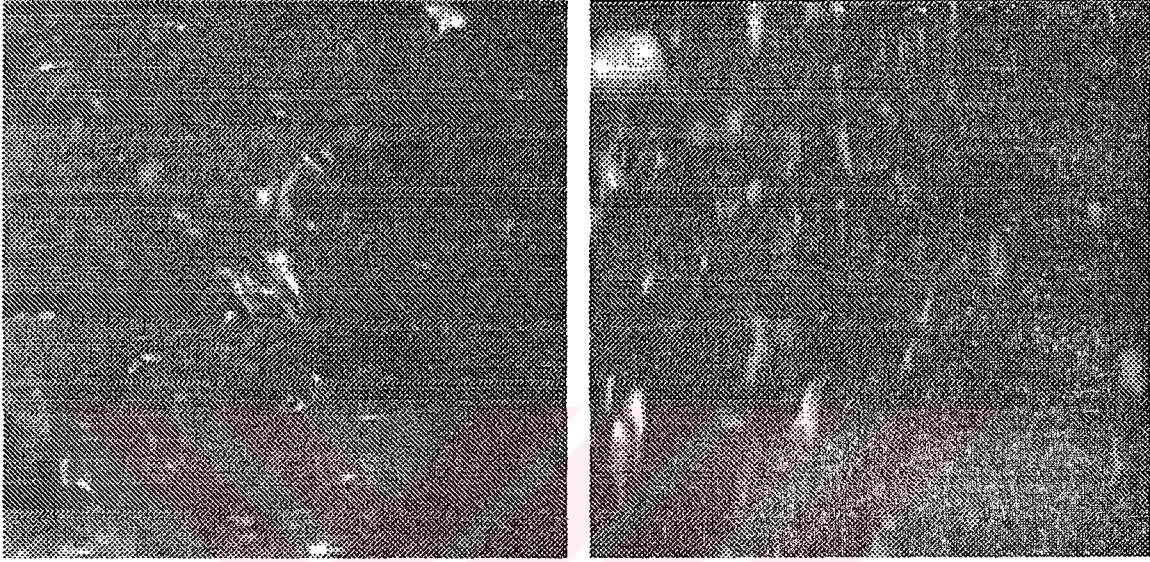
Şekil 3.7 Sert polistren köpüklerden A numunesi.

Şekil 3.7’de A numunesinin ışık mikroskobu altında 50 büyütme ile çekilmiş fotoğrafı görülmektedir. Soldaki numunenin normali ısı akısı doğrultusunda olan yönünden çekilmiş bir görüntüsü, sağdaki ise numunenin 3 cm kalınlığındaki derinlik doğrultusundan çekilmiş bir görüntüsüdür. A numunesinin gözenekliliği %96.1 olarak hesapla bulunmuştur. Bu görüntülerde beyaz görünen kısımlar katı kısmı, gri görünen kısımlar ise hava olduğu kabul edilen akışkan kısmı göstermektedir. Görüntülerden A numunesinin homojen (dağılım olarak yönden bağımsız) ve izotrop (fiziksel özellikleri yönden bağımsız) kabul edilmeye uygun bir numune olduğunu söyleyebiliriz. Ayrıca boşlukların tüm yapıya hakim olması dolayısıyla hesapladığımız gözenekliliğin tamamen doğru olmasa da kabul edilebilir olduğu görülmektedir.



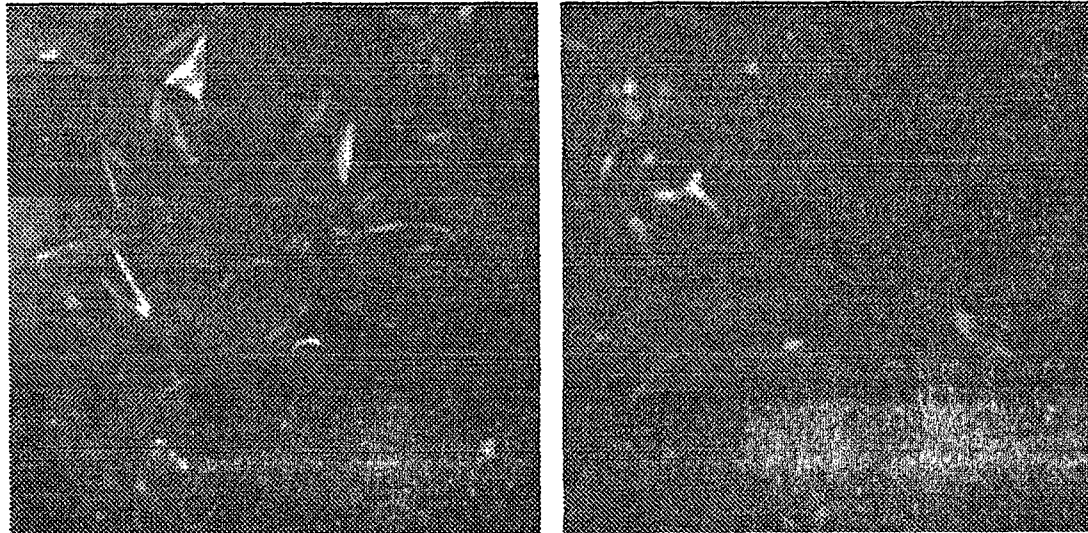
Şekil 3.8 Sert polistren köpüklerden B numunesi.

Şekil 3.8'de B numunesinin ışık mikroskobu altında 50 büyütme ile çekilmiş fotoğrafı görülmektedir. Soldaki numunenin normali ısı akısı doğrultusunda olan yönünden çekilmiş bir görüntüsü, sağdaki ise numunenin 5 cm kalınlığındaki derinlik doğrultusundan çekilmiş bir görüntüsüdür. B numunesinin gözenekliliği %96.6 olarak hesapla bulunmuştur. A numunesi için söylediğimiz diğer şeyler bu numune içinde aynen geçerlidir.



Şekil 3.9 Sert polistren köpüklerden E numunesi.

Şekil 3.9'da E numunesinin ışık mikroskobu altında 50 büyütme ile çekilmiş fotoğrafı görülmektedir. Soldaki numunenin normali ısı akısı doğrultusunda olan yönünden çekilmiş bir görüntüsü, sağdaki ise numunenin 5 cm kalınlığındaki derinlik doğrultusundan çekilmiş bir görüntüsüdür. E numunesinin gözenekliliği %97.3 olarak hesapla bulunmuştur. A numunesi için söylediğimiz diğer şeyler bu numune içinde aynen geçerlidir.



Şekil 3.10 Sert polistren köpüklerden F numunesi.

Şekil 3.10'da F numunesinin ışık mikroskobu altında 50 büyütme ile çekilmiş fotoğrafı görülmektedir. Soldaki numunenin normali ışık akışı doğrultusunda olan yönünden çekilmiş bir görüntüsü, sağdaki ise numunenin 5 cm kalınlığındaki derinlik doğrultusundan çekilmiş bir görüntüsüdür. F numunesinin gözenekliliği %97.4 olarak hesapla bulunmuştur. A numunesi için söylediğimiz diğer şeyler bu numune içinde aynen geçerlidir.

### 3.3 Gözenekliliğin Ölçülmesi

Gözenekliliğin ölçülmesi oldukça zor bir olaydır. Zira gözenekliliği oluşturan boşluklar birbirine bağlı veya bağımsız açık veya kapalı kanallardır. Dolayısıyla test edilecek örneğin boşluk yapısına göre bir gözeneklilik ölçüm metodu seçmek ve aynı zamanda bu metodu uygulayacak araçlara sahip olmak büyük bir şanstır.

Gözeneklilik ölçümü için boşluklar uygun bir akışkanla doldurularak doldurulan akışkanın hacim miktarının ölçülmesi yoluna gidilir. Boşlukları doldururken 2 metod izlenir. Bunlardan birincisi akışkana basınç kazandırarak boşlukları doldurmaktır. İkincisi ise numunenin su içinde uzun süre bekletilerek suyun boşluklarını doldurmasının beklenmesidir.

Akışkanın basınçlandırılarak boşlukların doldurulması deney süresinin kısalığı açısından avantajlıdır. Ayrıca boşluklardaki hava tamamen hacmi terk ederek yerini boşlukları doldurması düşünülen akışkana bırakır böylece toplam boşluk hacmi doğru olarak ölçülür. Diğer yöntemde ise boşluklardan havanın çıkması için akışkan numunenin altından beslenmelidir.

Bu çalışmada sert polistren köpük numunelerin gözenekliliklerinin tespiti için civalı porozimetre yönteminin kullanması düşünülmüştü. Numune test ettirildi ama maalesef bu yöntemle sonuç alınamadı.

Diğer yöntem olan numuneyi suda uzun süre bekleterek boşlukların dolmasını beklemeyi de tercih etmedik. Çünkü numunelerin suya doyması çok uzun zaman alacaktı. Ayrıca numunelerimizin içinde hava bulunan çok miktarda kapalı boşluk içermesi boşlukların su ile tamamen dolmasını imkansız kılacak ve doğru bir ölçüm sonucu alamayacaktı.

Dolayısıyla gözenekliliği aşağıdaki hesap yöntemiyle bulduk. Ve daha sonraki çalışmalarımız için civalı porozimetrede gözenekliliklerini kesinlikle ölçebileceğimiz numuneleri bizzat kendimiz üretme fikrine varıldı.

$$P = \frac{V_b}{V_T} \quad (3.4)$$

Burada  $p$ , gözeneklilik (%),  $V_b$ , boşlukların hacmi ( $\text{cm}^3$ ),  $V_T$ , toplam hacimdir ( $\text{cm}^3$ ).

Toplam kütle boşlukların ve dolu kısmın toplamına eşittir.

$$M_T = M_b + M_d \quad (3.5)$$

Denklemin her iki tarafını  $V_T$  ile bölelim.

$$\rho_T = \rho_b \frac{V_b}{V_T} + \rho_d \frac{V_d}{V_T} \quad (3.6)$$

Denklemi elde edilir. Bu da aşağıdaki denkleme dönüşür.

$$\rho_T = \rho_b p + \rho_d (1 - p) \quad (3.7)$$

Bu denklem gözeneklilik hesabımız için temel oluşturdu. Dolu kısım polistren, boşluklar ise hava ile doldurulmuş olarak değerlendirildi.

### 3.4 Termokuplların kalibrasyonu

Termokupllar laboratuvar ortamında (1 atm ve  $\approx 20$  °C) kaynamakta olan suya (100 °C kabul edilebilir) ve erimeye başlamış olan buza (0 °C kabul edilebilir) temas ettirilerek gösterdiği değerler kullanılarak termokupl kalibrasyon eğrileri çizildi. Bu eğriler Ek 1'de verilmiştir.

#### 4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

##### 4.1 Bir Katlı Gözenekli Levhanın Isı İletim Katsayısının Ölçümü

Bölüm (3.2.1)'de anlatıldığı gibi oluşturulan bir katlı gözenekli levhanın ısı iletim katsayısının ölçümü yapılmıştır. Ölçümlere ait değer ve grafikler aşağıda sunulmuştur.

Çizelge 4.1 Termokupllardan alınan sıcaklık değerleri

Saat	TC1	TC2	TC3	TC4	TC5	TC6	TC7	TC8	TC9
19:53	33,50	8,26	10,60	1,03	19,90	18,75	11,87	40,67	19,21
20:05	34,27	8,30	10,67	1,08	19,60	19,55	11,92	35,00	19,39
20:17	33,43	8,19	10,56	1,09	19,93	18,56	11,80	40,00	19,02
20:29	33,98	8,25	10,62	1,03	19,62	19,49	11,86	34,95	19,33
20:41	33,43	8,06	10,43	1,09	19,68	18,55	11,68	38,90	18,65
20:53	33,87	8,14	10,63	0,92	19,38	19,25	11,87	34,84	18,85
21:05	34,23	7,89	10,38	0,92	20,63	19,25	11,62	38,35	18,71
21:17	33,73	8,13	10,37	0,90	19,24	18,99	11,86	34,83	18,83
21:29	34,19	8,10	10,71	0,88	20,97	19,59	11,96	37,84	19,06
21:41	33,46	8,10	10,34	0,88	19,22	18,84	11,46	35,90	18,68
21:53	34,06	7,96	10,45	0,87	20,33	19,33	11,95	37,22	18,92
22:05	33,80	7,95	10,44	0,85	20,32	19,06	11,56	38,30	18,66
04:04	33,79	8,19	10,55	0,84	20,30	19,30	11,79	38,89	18,88
22:29	34,04	8,19	10,68	0,97	19,93	19,55	11,80	35,25	19,02
22:41	33,79	7,94	10,55	0,97	20,68	19,05	11,67	39,51	18,77
22:53	34,28	8,06	10,55	0,84	19,80	19,55	11,92	35,01	19,02
23:05	33,55	7,94	10,43	0,84	20,05	18,93	11,67	38,66	18,77
23:17	34,04	8,19	10,55	0,97	19,80	19,55	11,80	35,01	19,01
06:57	34,28	7,69	10,43	0,84	20,68	19,43	11,67	37,93	19,02
23:41	33,79	7,81	10,43	0,84	19,55	19,18	11,67	35,37	18,89
23:52	34,27	8,42	10,66	0,83	20,54	19,54	11,79	37,43	19,13
00:04	34,61	8,02	10,51	0,93	20,26	19,39	11,51	36,92	18,98
00:16	33,86	8,01	10,63	0,79	20,13	19,13	11,62	37,39	18,97
00:28	34,34	8,12	10,49	0,78	20,36	19,49	11,86	37,26	19,08
00:40	33,48	8,24	10,48	0,76	19,35	18,60	11,35	37,00	18,69
00:52	34,08	7,86	10,35	0,76	20,23	19,22	11,72	38,95	18,94
01:04	34,45	7,74	10,60	0,75	20,46	19,46	11,58	36,62	19,06
01:16	33,95	8,10	10,59	0,88	19,96	19,21	11,71	39,91	18,93
01:28	34,56	8,10	10,84	0,88	20,71	19,84	11,83	37,11	19,30
01:40	33,80	7,70	10,44	0,85	19,19	19,19	11,68	36,36	18,78
01:52	34,54	8,21	10,70	0,86	20,45	19,70	11,70	37,22	19,17
02:04	33,57	7,96	10,45	0,86	18,95	18,82	11,57	37,46	18,67
02:16	33,95	8,10	10,46	0,88	19,70	19,20	11,95	36,86	19,04
02:28	34,30	8,09	10,58	0,88	20,59	19,34	11,71	39,18	19,06
02:40	33,71	8,10	10,34	0,88	19,34	18,96	11,46	36,50	18,93
02:52	34,19	7,97	10,34	0,88	20,84	19,46	11,71	40,39	19,18
03:04	33,83	7,97	10,46	0,88	19,59	18,96	11,71	36,26	18,81
03:16	34,19	8,22	10,71	0,88	20,46	19,21	11,58	40,76	19,06
03:28	34,54	8,09	10,58	0,86	20,32	19,82	11,45	36,25	19,29
03:40	34,29	8,20	10,44	0,85	20,19	19,19	11,81	40,98	19,15
03:52	34,90	8,32	10,69	0,85	20,31	19,81	11,56	36,11	19,53

Çizelge 4.1'in devamı

04:04	34,16	7,94	10,55	0,84	20,17	19,17	11,80	41,45	19,14
04:16	34,76	8,18	10,68	0,84	20,42	19,80	11,80	35,86	19,39
04:28	34,02	8,17	10,66	0,83	20,16	19,04	11,66	41,56	19,13
04:40	34,62	8,16	10,77	0,81	20,40	19,90	11,65	35,71	19,61
04:52	33,88	8,02	10,64	0,93	20,26	19,01	11,78	42,02	19,10
04:04	34,36	8,15	10,90	0,94	19,77	19,90	11,52	35,71	19,61
05:16	33,77	7,91	10,40	0,81	20,02	18,90	11,27	42,03	18,99
05:28	34,25	8,16	10,77	0,94	19,52	19,40	11,77	35,83	19,49
05:40	34,75	8,30	10,54	0,95	21,04	19,66	11,66	41,92	19,50
05:52	34,14	8,42	10,79	0,95	19,29	19,29	11,66	35,85	19,38
06:04	34,52	8,31	10,80	0,96	20,80	19,55	11,67	41,57	19,52
06:16	33,79	8,31	10,68	0,96	18,67	18,92	11,55	35,74	19,14
06:28	34,51	8,43	10,80	0,96	20,55	19,67	11,80	42,06	19,52
06:40	33,77	8,28	10,65	0,94	18,90	18,90	11,70	35,71	19,12
06:52	34,51	8,30	10,66	0,95	20,66	19,54	11,91	41,92	19,38
07:04	33,52	8,16	10,65	0,94	18,90	18,65	11,29	35,85	19,19
07:16	34,29	8,79	10,79	0,95	20,41	19,54	11,78	41,44	19,38
07:28	33,52	8,28	10,53	0,94	18,65	18,40	11,65	35,95	18,99
07:40	34,25	8,53	10,65	0,94	20,52	19,02	11,77	41,18	19,37
07:52	33,39	8,27	10,64	1,05	18,88	17,26	11,26	36,06	18,98
08:04	34,50	8,53	10,90	1,06	20,90	18,02	11,77	41,05	19,48
08:16	33,63	8,40	10,64	1,05	18,76	17,01	11,63	35,94	18,98
08:28	34,25	8,41	10,77	1,06	20,40	17,52	11,65	40,94	19,37
08:40	33,54	8,17	10,54	1,08	18,91	16,78	11,41	36,09	19,00
08:52	34,25	8,16	10,64	1,05	20,64	17,38	11,63	40,93	19,23
09:04	35,52	8,41	10,65	1,06	19,15	16,64	11,27	36,20	18,99
09:16	34,39	8,42	10,79	1,08	20,16	17,16	11,53	40,47	19,38
09:28	33,55	8,18	10,55	1,21	19,17	16,80	11,55	36,34	19,02
09:40	34,17	8,45	10,94	1,22	20,31	17,06	11,81	39,88	19,40
09:52	33,45	8,46	10,70	1,24	19,07	16,70	11,57	36,49	19,04
10:04	34,22	8,50	10,86	1,28	19,86	17,10	11,73	39,08	19,33
10:16	34,50	8,16	10,65	1,19	20,03	17,27	11,65	36,93	19,24

Çizelge 4.2 Düzeltilmiş sıcaklık değerleri

Saat	TC1	TC2	TC3	TC4	TC5	TC6	TC7	TC8	TC9
19:53	32,70	7,35	9,60	0,23	22,32	20,28	11,30	39,84	18,20
20:05	33,47	7,39	9,67	0,28	22,07	20,96	11,35	34,24	18,38
20:17	32,64	7,28	9,56	0,29	22,34	20,12	11,23	39,18	18,01
20:29	33,18	7,34	9,62	0,23	22,09	20,91	11,29	34,19	18,32
20:41	32,64	7,15	9,44	0,29	22,14	20,11	11,12	38,09	17,65
20:53	33,07	7,23	9,63	0,12	21,90	20,71	11,30	34,08	17,85
21:05	33,43	6,98	9,39	0,12	22,92	20,71	11,06	37,55	17,71
21:17	32,93	7,22	9,38	0,10	21,78	20,48	11,29	34,07	17,83
21:29	33,39	7,19	9,71	0,08	23,19	21,00	11,39	37,04	18,05
21:41	32,67	7,19	9,35	0,08	21,76	20,36	10,90	35,13	17,68
21:53	33,26	7,05	9,46	0,07	22,67	20,77	11,38	36,43	17,92
22:05	33,00	7,04	9,45	0,05	22,66	20,54	11,00	37,50	17,66
04:04	32,99	7,28	9,56	0,04	22,65	20,75	11,22	38,08	17,88
22:29	33,24	7,28	9,68	0,17	22,34	20,96	11,23	34,46	18,01
22:41	32,99	7,03	9,56	0,17	22,96	20,53	11,11	38,70	17,77
22:53	33,48	7,15	9,56	0,04	22,24	20,96	11,35	34,25	18,01

Çizelge 4.2'nin devamı

23:05	32,75	7,03	9,44	0,04	22,44	20,43	11,11	37,86	17,77
23:17	33,24	7,28	9,56	0,17	22,24	20,96	11,23	34,25	18,00
06:57	33,48	6,78	9,44	0,04	22,96	20,86	11,11	37,13	18,01
23:41	32,99	6,90	9,44	0,04	22,03	20,65	11,11	34,60	17,89
23:52	33,47	7,51	9,66	0,03	22,84	20,95	11,22	36,64	18,12
00:04	33,81	7,11	9,52	0,13	22,61	20,83	10,95	36,14	17,97
00:16	33,06	7,10	9,63	-0,01	22,51	20,60	11,06	36,60	17,96
00:28	33,54	7,21	9,50	-0,02	22,70	20,91	11,29	36,47	18,07
00:40	32,68	7,33	9,49	-0,04	21,87	20,15	10,79	36,21	17,69
00:52	33,28	6,95	9,36	-0,04	22,59	20,68	11,16	38,14	17,94
01:04	33,65	6,83	9,60	-0,05	22,78	20,89	11,02	35,84	18,05
01:16	33,15	7,19	9,59	0,08	22,37	20,67	11,15	39,09	17,93
01:28	33,76	7,19	9,84	0,08	22,98	21,21	11,26	36,32	18,29
01:40	33,00	6,79	9,45	0,05	21,74	20,65	11,12	35,58	17,78
01:52	33,74	7,30	9,70	0,06	22,77	21,09	11,14	36,43	18,16
02:04	32,77	7,05	9,46	0,06	21,54	20,34	11,01	36,67	17,67
02:16	33,15	7,19	9,47	0,08	22,16	20,66	11,38	36,08	18,03
02:28	33,50	7,18	9,58	0,08	22,88	20,78	11,15	38,37	18,05
02:40	32,91	7,19	9,35	0,08	21,86	20,46	10,90	35,72	17,93
02:52	33,39	7,06	9,35	0,08	23,09	20,89	11,15	39,57	18,17
03:04	33,03	7,06	9,47	0,08	22,07	20,46	11,15	35,48	17,81
03:16	33,39	7,31	9,71	0,08	22,78	20,67	11,02	39,93	18,05
03:28	33,74	7,18	9,58	0,06	22,66	21,19	10,89	35,47	18,28
03:40	33,49	7,29	9,45	0,05	22,56	20,65	11,24	40,15	18,14
03:52	34,10	7,41	9,69	0,05	22,65	21,18	11,00	35,33	18,52
04:04	33,36	7,03	9,56	0,04	22,54	20,64	11,23	40,62	18,13
04:16	33,96	7,27	9,68	0,04	22,74	21,18	11,23	35,09	18,38
04:28	33,22	7,26	9,66	0,03	22,53	20,53	11,10	40,72	18,12
04:40	33,82	7,25	9,77	0,01	22,73	21,26	11,09	34,94	18,60
04:52	33,08	7,11	9,64	0,13	22,61	20,50	11,19	41,18	18,09
04:04	33,56	7,24	9,90	0,14	22,21	21,26	10,96	34,94	18,60
05:16	32,97	7,00	9,41	0,01	22,42	20,41	10,71	41,19	17,98
05:28	33,45	7,25	9,77	0,14	22,01	20,83	11,20	35,06	18,48
05:40	33,95	7,39	9,55	0,15	23,25	21,06	11,10	41,08	18,49
05:52	33,34	7,51	9,79	0,15	21,82	20,74	11,10	35,08	18,37
06:04	33,72	7,40	9,80	0,16	23,06	20,96	11,11	40,73	18,51
06:16	32,99	7,40	9,68	0,16	21,32	20,42	10,99	34,97	18,13
06:28	33,71	7,52	9,80	0,16	22,85	21,06	11,23	41,22	18,51
06:40	32,97	7,37	9,65	0,14	21,50	20,41	11,14	34,94	18,11
06:52	33,71	7,39	9,66	0,15	22,94	20,95	11,34	41,08	18,37
07:04	32,72	7,25	9,65	0,14	21,50	20,19	10,73	35,08	18,18
07:16	33,49	7,88	9,79	0,15	22,74	20,95	11,21	40,61	18,37
07:28	32,72	7,37	9,54	0,14	21,30	19,98	11,09	35,18	17,98
07:40	33,45	7,62	9,65	0,14	22,83	20,51	11,20	40,35	18,36
07:52	32,60	7,36	9,64	0,25	21,49	19,00	10,70	35,28	17,97
08:04	33,70	7,62	9,90	0,26	23,14	19,65	11,20	40,22	18,47
08:16	32,83	7,49	9,64	0,25	21,39	18,79	11,07	35,17	17,97
08:28	33,45	7,50	9,77	0,26	22,73	19,23	11,09	40,11	18,36
08:40	32,74	7,26	9,55	0,28	21,51	18,59	10,85	35,31	17,99
08:52	33,45	7,25	9,64	0,25	22,92	19,11	11,07	40,10	18,22
09:04	34,72	7,50	9,65	0,26	21,71	18,47	10,71	35,42	17,98
09:16	33,59	7,51	9,79	0,28	22,53	18,92	10,97	39,65	18,37

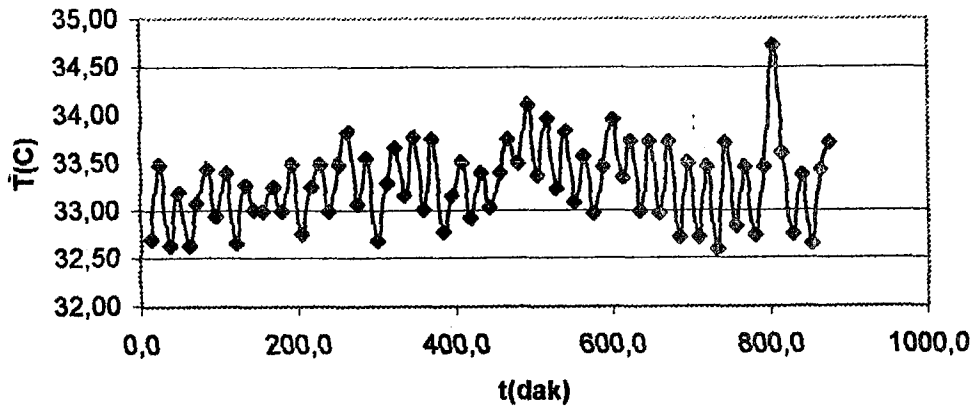
Çizelge 4.2'nin devamı

09:28	32,75	7,27	9,56	0,41	21,72	18,61	10,99	35,56	18,01
09:40	33,37	7,54	9,94	0,42	22,65	18,83	11,24	39,06	18,39
09:52	32,66	7,55	9,70	0,44	21,64	18,53	11,01	35,71	18,03
10:04	33,42	7,59	9,86	0,48	22,29	18,87	11,17	38,27	18,32
10:16	33,70	7,25	9,65	0,39	22,43	19,01	11,09	36,14	18,23

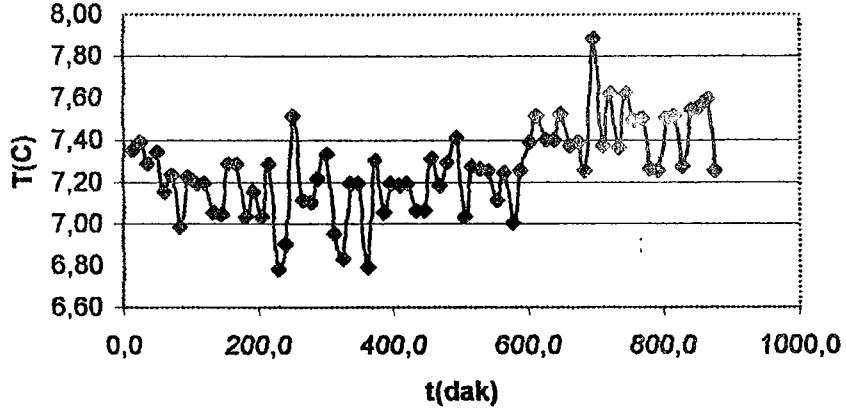
Çizelge 4.3 Isıl iletkenliğin hesabı

dT(2-9)	dT(3-6)	dT(5-7)	dTort	P(W)	A(m <sup>2</sup> )	L(m)	$\lambda$ (W/m.K)	K(W/m <sup>2</sup> K)
10,85	10,67	11,02	10,85	30,00	0,1444	0,0034	0,0651	19,15444
10,99	11,29	10,72	11,00	30,00	0,1444	0,0034	0,0642	18,88839
10,73	10,55	11,11	10,80	30,00	0,1444	0,0034	0,0654	19,24153
10,98	11,29	10,80	11,02	30,00	0,1444	0,0034	0,0641	18,85171
10,49	10,67	11,02	10,73	30,00	0,1444	0,0034	0,0658	19,36217
10,61	11,07	10,59	10,76	30,00	0,1444	0,0034	0,0657	19,3104
10,72	11,32	11,86	11,30	30,00	0,1444	0,0034	0,0625	18,38437
10,60	11,11	10,49	10,73	30,00	0,1444	0,0034	0,0658	19,35803
10,86	11,28	11,80	11,32	30,00	0,1444	0,0034	0,0624	18,36082
10,48	11,01	10,86	10,79	30,00	0,1444	0,0034	0,0655	19,26202
10,86	11,32	11,29	11,16	30,00	0,1444	0,0034	0,0633	18,62226
10,61	11,10	11,67	11,13	30,00	0,1444	0,0034	0,0635	18,67371
10,59	11,19	11,42	11,07	30,00	0,1444	0,0034	0,0638	18,76856
10,73	11,28	11,11	11,04	30,00	0,1444	0,0034	0,0640	18,81877
10,73	10,98	11,85	11,19	30,00	0,1444	0,0034	0,0631	18,56958
10,86	11,41	10,89	11,05	30,00	0,1444	0,0034	0,0639	18,79937
10,73	11,00	11,34	11,02	30,00	0,1444	0,0034	0,0641	18,84956
10,72	11,41	11,00	11,04	30,00	0,1444	0,0034	0,0640	18,81167
11,23	11,42	11,85	11,50	30,00	0,1444	0,0034	0,0614	18,06352
10,98	11,21	10,93	11,04	30,00	0,1444	0,0034	0,0640	18,81898
10,61	11,29	11,62	11,17	30,00	0,1444	0,0034	0,0632	18,59515
10,86	11,31	11,67	11,28	30,00	0,1444	0,0034	0,0626	18,42021
10,86	10,97	11,45	11,09	30,00	0,1444	0,0034	0,0637	18,72756
10,86	11,42	11,40	11,23	30,00	0,1444	0,0034	0,0629	18,50694
10,35	10,66	11,08	10,70	30,00	0,1444	0,0034	0,0660	19,41756
10,98	11,32	11,43	11,25	30,00	0,1444	0,0034	0,0628	18,47368
11,22	11,28	11,76	11,42	30,00	0,1444	0,0034	0,0619	18,1922
10,73	11,08	11,22	11,01	30,00	0,1444	0,0034	0,0642	18,86868
11,10	11,37	11,72	11,39	30,00	0,1444	0,0034	0,0620	18,23308
10,98	11,21	10,62	10,94	30,00	0,1444	0,0034	0,0646	18,99334
10,86	11,39	11,63	11,29	30,00	0,1444	0,0034	0,0625	18,39669
10,61	10,88	10,54	10,68	30,00	0,1444	0,0034	0,0662	19,45728
10,84	11,20	10,77	10,94	30,00	0,1444	0,0034	0,0646	18,9951
10,87	11,20	11,74	11,27	30,00	0,1444	0,0034	0,0627	18,43662
10,73	11,11	10,96	10,94	30,00	0,1444	0,0034	0,0646	18,99919
11,11	11,54	11,94	11,53	30,00	0,1444	0,0034	0,0613	18,01947
10,74	10,99	10,92	10,89	30,00	0,1444	0,0034	0,0649	19,08598
10,74	10,96	11,76	11,15	30,00	0,1444	0,0034	0,0633	18,6283
11,10	11,61	11,77	11,49	30,00	0,1444	0,0034	0,0615	18,0768
10,85	11,21	11,31	11,12	30,00	0,1444	0,0034	0,0635	18,67745
11,10	11,49	11,66	11,42	30,00	0,1444	0,0034	0,0619	18,19628
11,10	11,08	11,31	11,16	30,00	0,1444	0,0034	0,0633	18,61193
11,11	11,49	11,51	11,37	30,00	0,1444	0,0034	0,0621	18,2728

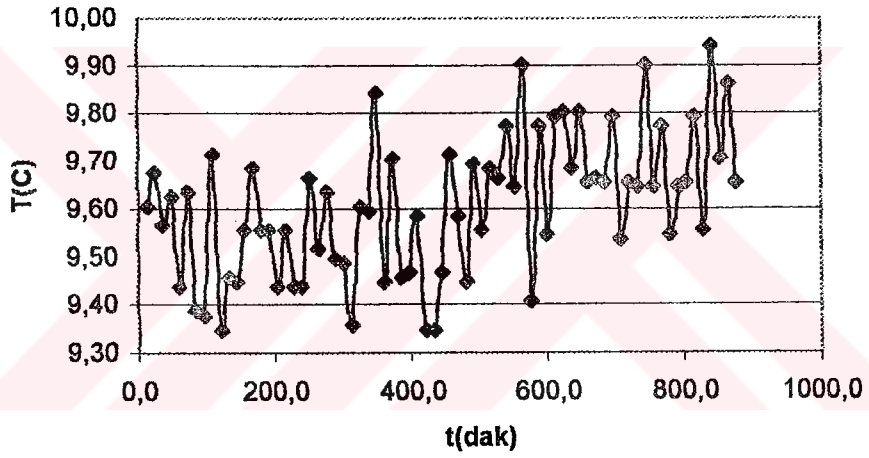
11,34	11,49	11,64	11,49	30,00	0,1444	0,0034	0,0615	18,07929
10,98	10,86	11,42	11,09	30,00	0,1444	0,0034	0,0637	18,74197
11,35	11,36	11,26	11,32	30,00	0,1444	0,0034	0,0624	18,34821
10,98	11,00	11,71	11,23	30,00	0,1444	0,0034	0,0629	18,50236
11,22	11,06	10,80	11,03	30,00	0,1444	0,0034	0,0640	18,83485
11,09	11,51	12,15	11,59	30,00	0,1444	0,0034	0,0610	17,93017
10,86	10,95	10,73	10,84	30,00	0,1444	0,0034	0,0651	19,16019
11,10	11,16	11,95	11,40	30,00	0,1444	0,0034	0,0619	18,21699
10,73	10,74	10,33	10,60	30,00	0,1444	0,0034	0,0666	19,60187
10,98	11,26	11,62	11,29	30,00	0,1444	0,0034	0,0626	18,40497
10,74	10,75	10,37	10,62	30,00	0,1444	0,0034	0,0665	19,56308
10,98	11,29	11,60	11,29	30,00	0,1444	0,0034	0,0626	18,40471
10,93	10,54	10,77	10,75	30,00	0,1444	0,0034	0,0657	19,33323
10,49	11,16	11,52	11,06	30,00	0,1444	0,0034	0,0639	18,78999
10,61	10,44	10,21	10,42	30,00	0,1444	0,0034	0,0678	19,93363
10,74	10,86	11,62	11,07	30,00	0,1444	0,0034	0,0638	18,7654
10,61	9,36	10,78	10,25	30,00	0,1444	0,0034	0,0689	20,26523
10,85	9,75	11,93	10,84	30,00	0,1444	0,0034	0,0651	19,15944
10,48	9,15	10,32	9,98	30,00	0,1444	0,0034	0,0708	20,81041
10,86	9,45	11,64	10,65	30,00	0,1444	0,0034	0,0663	19,50604
10,73	9,05	10,66	10,15	30,00	0,1444	0,0034	0,0696	20,47487
10,97	9,46	11,86	10,76	30,00	0,1444	0,0034	0,0656	19,30304
10,48	8,82	10,99	10,10	30,00	0,1444	0,0034	0,0699	20,57239
10,86	9,13	11,56	10,52	30,00	0,1444	0,0034	0,0672	19,75684
10,74	9,06	10,74	10,18	30,00	0,1444	0,0034	0,0694	20,41345
10,85	8,89	11,41	10,38	30,00	0,1444	0,0034	0,0680	20,00868
10,48	8,82	10,63	9,98	30,00	0,1444	0,0034	0,0708	20,81928
10,73	9,01	11,12	10,29	30,00	0,1444	0,0034	0,0687	20,19976
10,98	9,36	11,34	10,56	30,00	0,1444	0,0034	0,0669	19,67599
							TOP	4,7111
							ORT	0,0645
								18,98117



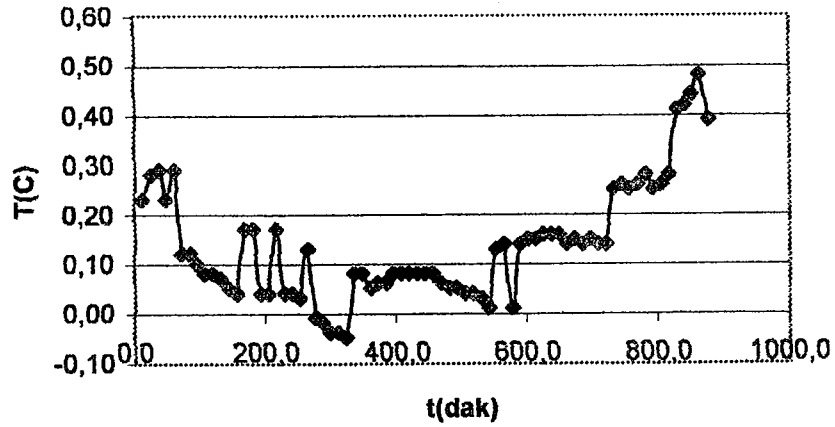
Şekil 4.1 Numune odası sıcaklığı-zaman grafiği



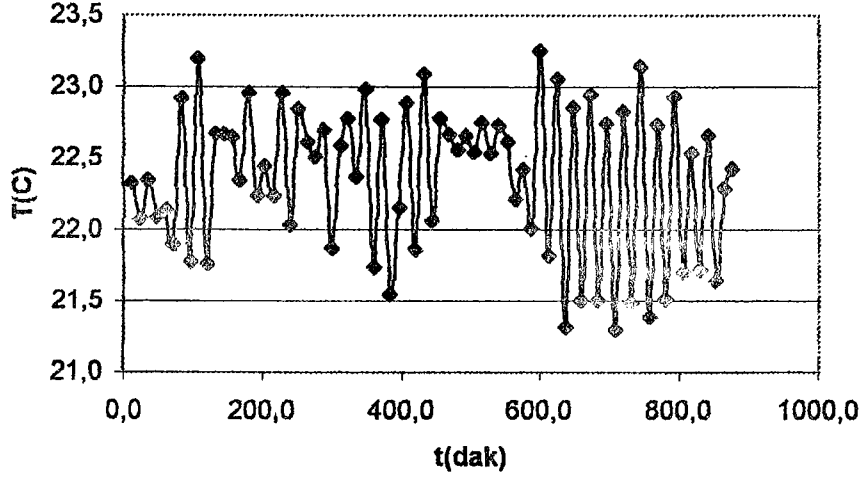
Şekil 4.2 Soğukyüz3 sıcaklığı-zaman grafiği



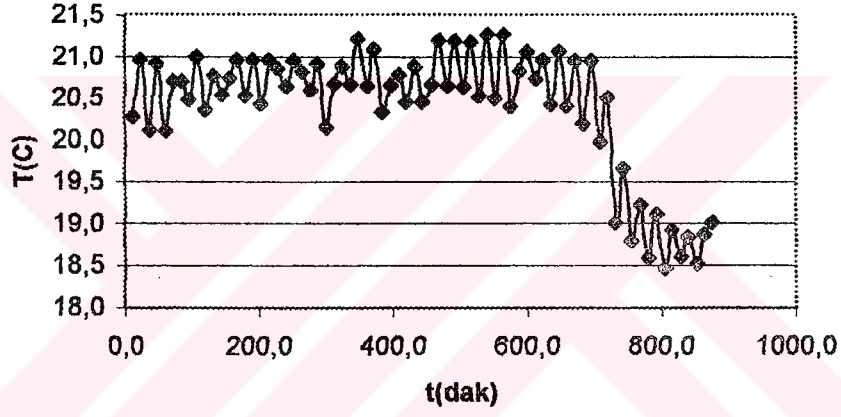
Şekil 4.3 Soğukyüz2 sıcaklığı-zaman grafiği



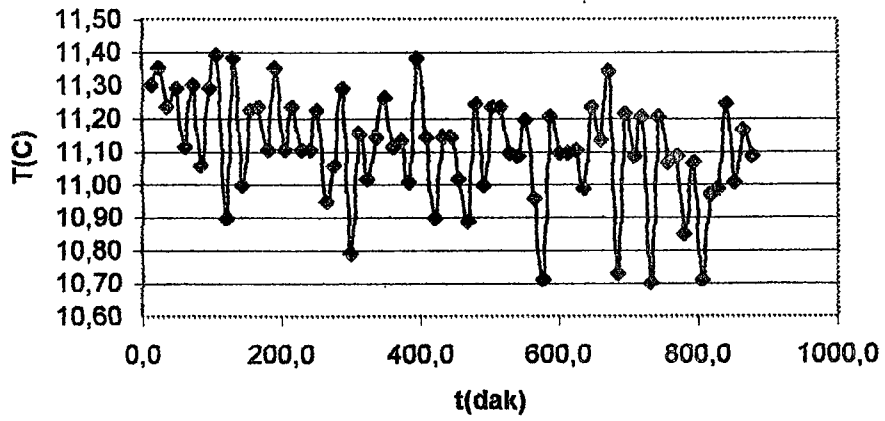
Şekil 4.4 Soğuk oda sıcaklığı-zaman grafiği



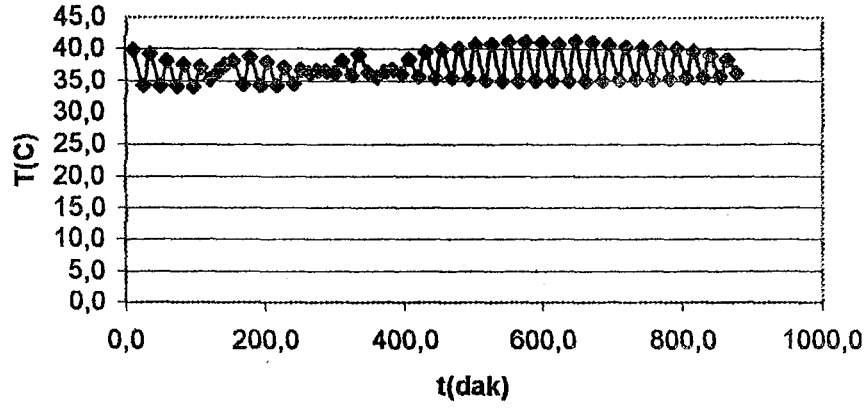
Şekil 4.5 Sıcakyüz1 sıcaklığı-zaman grafiği



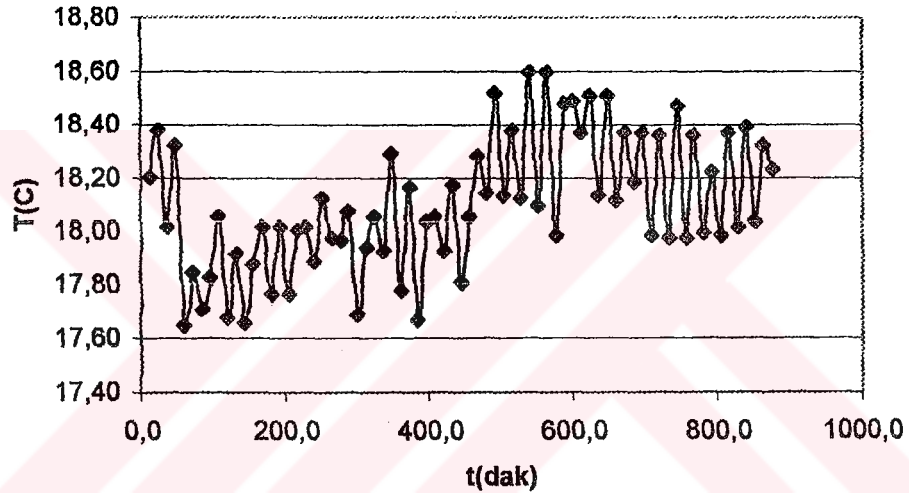
Şekil 4.6 Sıcakyüz2 sıcaklığı-zaman grafiği



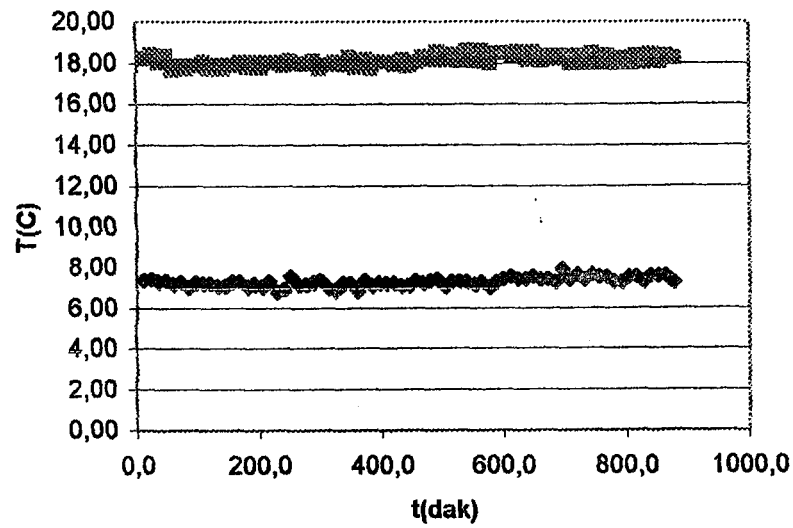
Şekil 4.7 Soğukyüz1 sıcaklığı-zaman grafiği



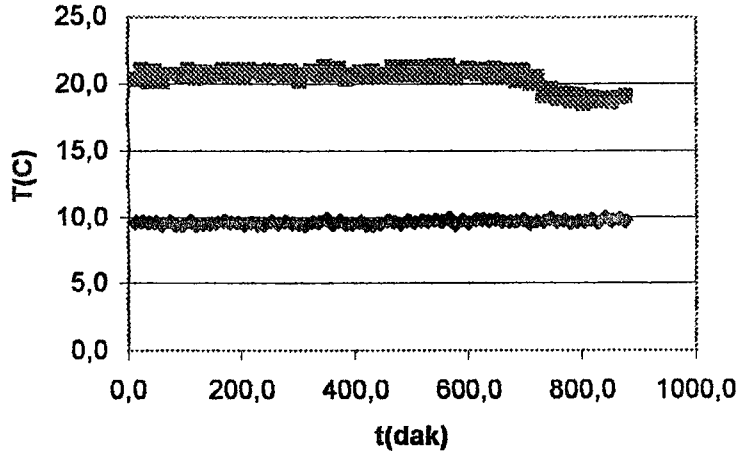
Şekil 4.8 Sıcak oda sıcaklığı-zaman grafiği



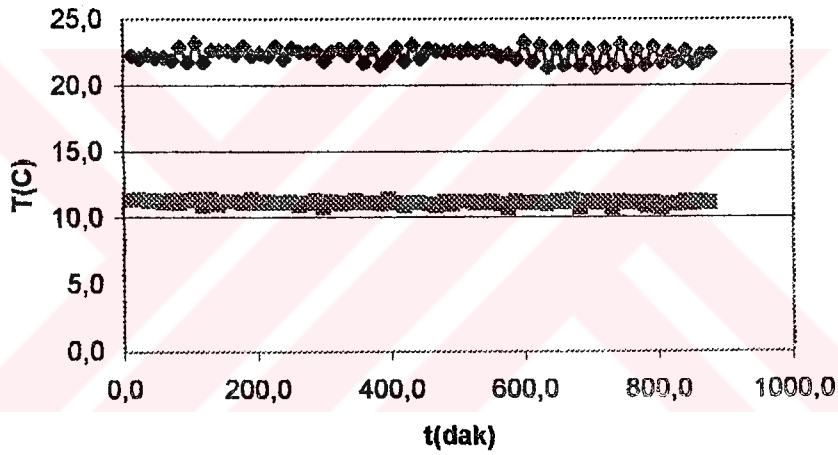
Şekil 4.9 Sıcakyüz3 sıcaklığı-zaman grafiği



Şekil 4.10 Sıcakyüz3-soğukyüz3 sıcaklıklarının karşılaştırılması



Şekil 4.11 Sıcak yüz 2-soğuk yüz 2 sıcaklıklarının karşılaştırılması



Şekil 4.12 Sıcak yüz 1-soğuk yüz 1 sıcaklıklarının karşılaştırılması

#### 4.2 İki Katlı Gözenekli Levhanın Isı İletim Katsayısının Ölçümü

Çizelge 4.4 Termokupllardan alınan sıcaklık değerleri

Saat	TC1	TC2	TC3	TC4	TC5	TC6	TC7	TC8	TC9
7:41	28,70	18,86	18,86	15,37	21,10	20,98	17,73	27,94	23,34
7:53	37,30	18,26	17,76	12,28	23,77	23,77	16,15	28,85	26,61
8:05	34,91	17,05	16,43	10,83	21,67	21,67	14,93	29,88	24,77
8:17	35,29	15,44	14,95	9,22	20,06	20,20	13,33	30,39	23,41
8:31	35,07	14,35	13,73	8,25	17,83	18,71	12,23	30,91	22,32
8:43	35,55	13,48	13,10	7,38	17,33	18,33	11,61	31,53	21,82
8:55	35,20	12,98	12,73	6,75	16,83	17,96	11,11	31,66	21,32
9:20	35,45	11,87	11,87	5,52	16,47	17,59	10,38	32,28	20,84
9:32	35,68	11,61	11,61	5,26	16,33	17,71	10,24	32,64	20,82
9:44	35,07	11,24	11,49	4,89	15,70	17,33	9,87	33,12	20,45

Çizelge 4.4'ün devamı

9:56	35,32	11,12	11,25	4,53	15,72	17,34	9,51	33,14	20,59
10:08	35,69	11,12	11,12	4,28	15,73	17,47	9,26	33,62	20,71
10:20	35,82	10,89	11,01	3,90	15,59	17,47	9,13	33,74	20,59
10:32	35,21	10,39	10,64	3,67	15,23	16,98	9,02	33,88	20,23
10:44	35,59	10,53	10,78	3,43	15,24	17,24	8,78	34,13	20,36
10:56	35,85	10,29	10,54	3,20	15,38	17,26	8,67	34,39	20,50
11:08	35,13	10,18	10,43	3,08	14,89	16,77	8,31	34,64	20,02
11:20	35,62	10,18	10,43	2,96	15,14	17,14	8,44	34,64	20,39
11:32	35,63	9,82	10,07	2,72	15,03	16,91	8,07	34,90	20,28
11:44	35,14	9,69	10,07	2,60	14,53	16,66	7,95	34,90	20,03
11:56	35,40	9,71	9,96	2,48	14,79	16,92	8,09	35,15	20,17
12:08	35,67	9,86	10,01	2,39	14,69	17,07	7,86	35,30	20,31
12:20	35,56	9,74	9,99	2,27	14,58	16,71	7,75	35,56	20,08
12:32	35,45	9,38	9,88	2,16	14,34	16,60	7,76	35,81	19,97
12:51	35,39	9,45	9,82	1,98	14,66	16,53	7,70	35,99	19,91
13:08	35,64	9,71	9,71	1,86	15,17	16,80	7,34	34,43	20,17
13:15	35,65	9,35	9,72	1,75	14,81	16,56	7,23	35,53	19,19
13:27	35,31	9,12	9,50	1,78	14,21	16,21	7,38	36,04	19,71
13:39	35,68	9,37	9,62	1,65	14,71	16,59	7,26	36,17	20,08
13:51	35,70	9,15	9,40	1,43	14,48	16,61	7,03	36,31	19,98
14:03	35,49	9,17	9,42	1,45	14,26	16,39	7,18	36,46	19,88
14:15	35,78	9,22	9,47	1,38	14,06	16,44	7,11	36,51	19,93
14:27	35,57	8,76	9,26	1,29	13,85	16,35	7,02	36,67	19,72
14:39	35,49	9,30	9,30	1,33	14,01	16,20	7,06	36,46	19,76
14:51	35,77	9,09	9,46	1,24	14,18	16,55	6,97	36,98	19,92
15:03	35,80	9,25	9,25	1,16	13,84	16,34	7,01	36,90	19,96
15:15	35,60	9,04	9,41	1,32	13,88	16,25	7,05	37,18	19,75
15:27	36,00	9,20	9,58	1,23	14,17	16,54	6,96	37,09	20,03
15:39	35,42	8,85	9,23	1,13	13,82	15,94	6,86	37,12	19,56
15:51	35,82	9,02	9,39	1,17	13,85	16,48	6,77	37,52	19,97
16:03	35,60	9,04	9,29	1,07	13,38	16,01	6,55	37,56	19,64
16:15	35,62	9,07	9,19	1,10	13,41	16,16	6,70	37,45	19,77
16:27	35,89	9,09	9,08	1,00	13,43	16,43	6,73	37,72	19,92

Çizelge 4.5 Düzeltilmiş Sıcaklık Değerleri

Saat	TC1	TC2	TC3	TC4	TC5	TC6	TC7	TC8	TC9
7:41	27,92	17,94	17,77	14,54	23,30	22,18	17,07	27,25	22,28
7:53	36,49	17,34	16,69	11,46	25,48	24,57	15,51	28,15	25,51
8:05	34,11	16,13	15,37	10,01	23,77	22,77	14,31	29,17	23,70
8:17	34,49	14,53	13,91	8,41	22,45	21,52	12,74	29,68	22,35
8:31	34,27	13,44	12,70	7,44	20,63	20,24	11,66	30,19	21,27
8:43	34,75	12,57	12,08	6,57	20,22	19,92	11,05	30,80	20,78
8:55	34,40	12,07	11,71	5,94	19,81	19,60	10,56	30,93	20,29
9:20	34,65	10,96	10,86	4,71	19,52	19,29	9,84	31,55	19,81
9:32	34,88	10,70	10,60	4,45	19,40	19,39	9,70	31,90	19,79
9:44	34,27	10,33	10,48	4,08	18,89	19,06	9,33	32,38	19,43
9:56	34,52	10,21	10,25	3,72	18,91	19,07	8,98	32,40	19,57
10:08	34,89	10,21	10,12	3,48	18,91	19,18	8,73	32,87	19,68
10:20	35,02	9,98	10,01	3,10	18,80	19,18	8,61	32,99	19,57
10:32	34,41	9,48	9,64	2,87	18,51	18,77	8,50	33,13	19,21

Çizelge 4.5'in devamı

10:44	34,79	9,62	9,78	2,63	18,51	18,99	8,26	33,38	19,34
10:56	35,05	9,38	9,55	2,40	18,63	19,00	8,15	33,63	19,48
11:08	34,33	9,27	9,44	2,28	18,23	18,59	7,80	33,88	19,00
11:20	34,82	9,27	9,44	2,16	18,43	18,90	7,93	33,88	19,37
11:32	34,83	8,91	9,08	1,92	18,34	18,71	7,56	34,14	19,26
11:44	34,34	8,78	9,08	1,80	17,93	18,49	7,45	34,14	19,01
11:56	34,60	8,80	8,97	1,68	18,15	18,71	7,58	34,38	19,15
12:08	34,87	8,95	9,02	1,59	18,06	18,84	7,36	34,53	19,29
12:20	34,76	8,83	9,00	1,47	17,97	18,53	7,25	34,79	19,06
12:32	34,65	8,47	8,89	1,36	17,78	18,44	7,26	35,04	18,95
12:51	34,59	8,54	8,83	1,18	18,04	18,38	7,20	35,22	18,89
13:08	34,84	8,80	8,72	1,06	18,46	18,61	6,85	33,67	19,15
13:15	34,85	8,44	8,73	0,95	18,16	18,41	6,74	34,76	18,18
13:27	34,51	8,21	8,52	0,98	17,67	18,11	6,88	35,26	18,70
13:39	34,88	8,46	8,64	0,85	18,08	18,43	6,77	35,39	19,06
13:51	34,90	8,24	8,42	0,63	17,89	18,45	6,54	35,53	18,96

Çizelge 4.5'in devamı

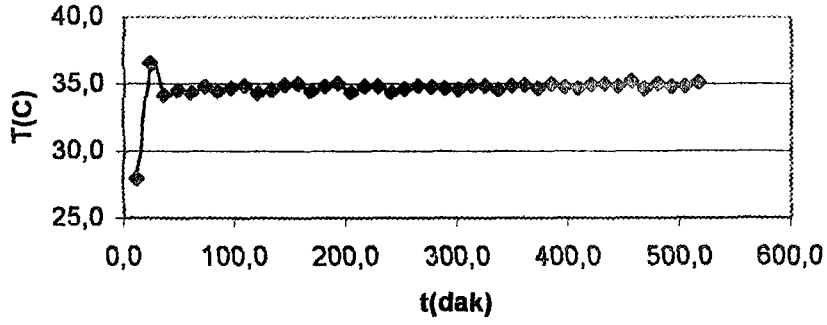
14:03	34,69	8,26	8,44	0,65	17,71	18,26	6,69	35,68	18,86
14:15	34,98	8,31	8,49	0,58	17,55	18,30	6,62	35,73	18,91
14:27	34,77	7,85	8,28	0,49	17,38	18,23	6,53	35,89	18,71
14:39	34,69	8,39	8,32	0,53	17,51	18,10	6,57	35,68	18,75
14:51	34,97	8,18	8,48	0,44	17,65	18,40	6,48	36,19	18,90
15:03	35,00	8,34	8,27	0,36	17,37	18,22	6,52	36,12	18,94
15:15	34,80	8,13	8,43	0,52	17,40	18,14	6,56	36,39	18,74
15:27	35,20	8,29	8,60	0,43	17,64	18,39	6,47	36,30	19,01
15:39	34,62	7,94	8,25	0,33	17,35	17,88	6,37	36,33	18,55
15:51	35,02	8,11	8,41	0,37	17,38	18,34	6,28	36,73	18,95
16:03	34,80	8,13	8,31	0,27	16,99	17,94	6,07	36,77	18,63
16:15	34,82	8,16	8,21	0,30	17,02	18,06	6,22	36,66	18,76
16:27	35,09	8,18	8,10	0,20	17,03	18,30	6,25	36,93	18,90

Çizelge 4.6 Isıl iletkenliğin hesabı

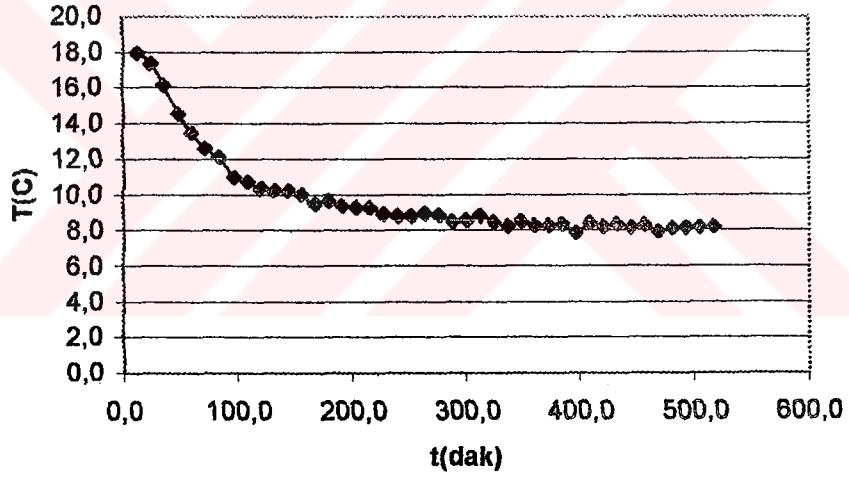
dT(2-9)	dT(3-6)	dT(5-7)	dTort	P(W)	A(m <sup>2</sup> )	L(m)	$\lambda$ (W/m.K)	K(W/m <sup>2</sup> K)
10,35	9,89	11,61	10,62	14,40	0,1444	0,0063	0,0592	9,39
9,74	9,67	11,43	10,28	14,40	0,1444	0,0063	0,0611	9,70
10,48	9,59	10,79	10,29	14,40	0,1444	0,0063	0,0611	9,69
10,60	9,80	11,31	10,57	14,40	0,1444	0,0063	0,0594	9,43
10,72	10,03	11,35	10,70	14,40	0,1444	0,0063	0,0587	9,32
10,60	9,82	11,03	10,48	14,40	0,1444	0,0063	0,0599	9,51
10,60	9,82	10,93	10,45	14,40	0,1444	0,0063	0,0601	9,54
10,85	9,95	10,85	10,55	14,40	0,1444	0,0063	0,0596	9,45
10,35	9,78	10,94	10,36	14,40	0,1444	0,0063	0,0607	9,63
10,72	9,92	11,17	10,60	14,40	0,1444	0,0063	0,0593	9,41
10,60	9,95	10,85	10,47	14,40	0,1444	0,0063	0,0600	9,53
10,60	9,71	10,84	10,39	14,40	0,1444	0,0063	0,0605	9,60
10,72	9,79	11,17	10,56	14,40	0,1444	0,0063	0,0595	9,44
10,60	9,63	10,98	10,40	14,40	0,1444	0,0063	0,0604	9,59
10,84	9,93	11,09	10,62	14,40	0,1444	0,0063	0,0592	9,39
10,49	9,63	10,93	10,35	14,40	0,1444	0,0063	0,0607	9,64

Çizelge 4.6'nın devamı

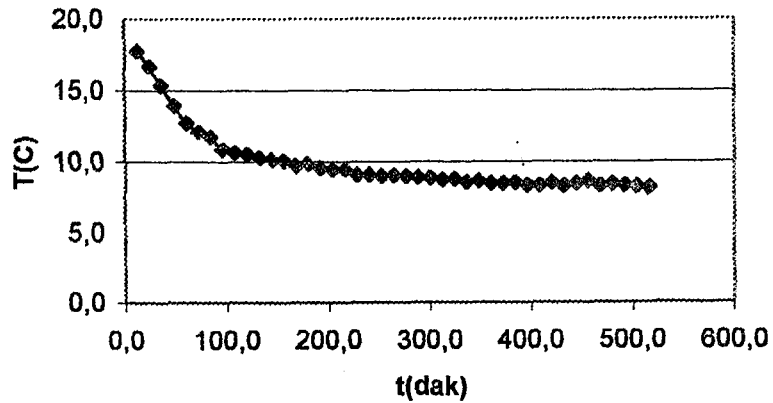
10,59	9,85	10,80	10,42	14,40	0,1444	0,0063	0,0603	9,57
10,72	10,19	10,79	10,57	14,40	0,1444	0,0063	0,0594	9,44
						TOP	1,0791	171,28
						ORT	0,0599	9,52



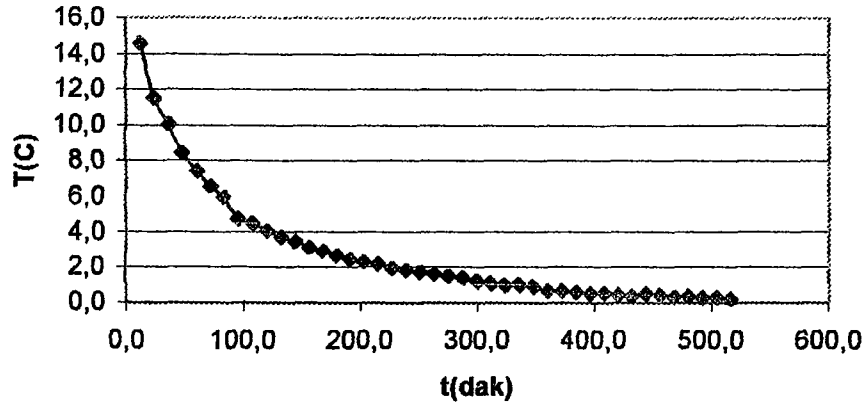
Şekil 4.13 Numune odası sıcaklığı-zaman grafiği



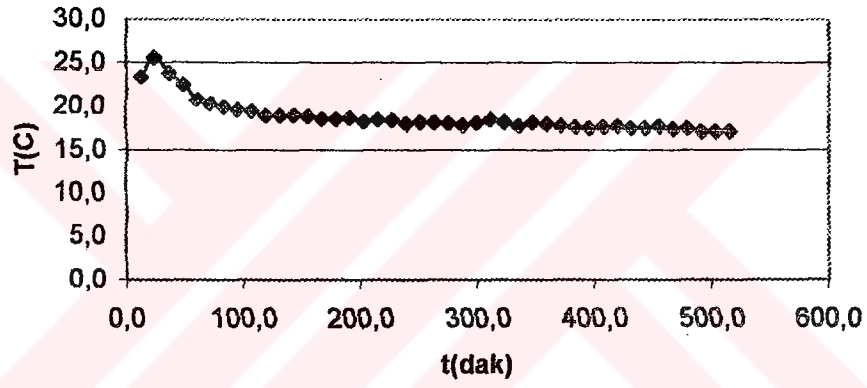
Şekil 4.14 Soğukyüz3 sıcaklığı-zaman grafiği



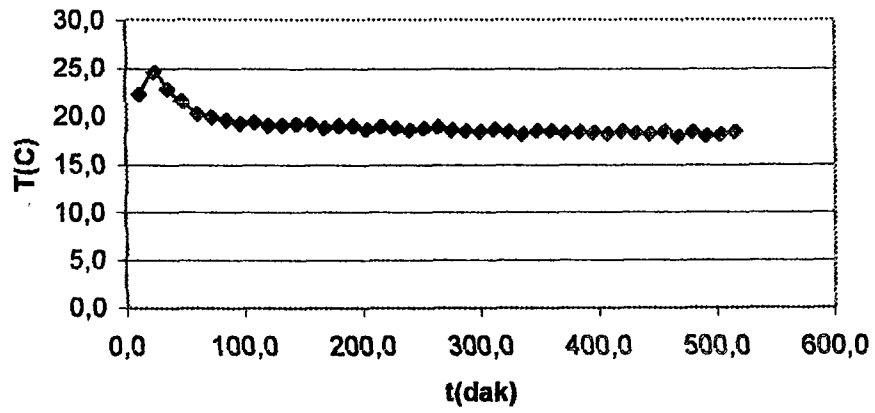
Şekil 4.15 Soğukyüz2 sıcaklığı-zaman grafiği



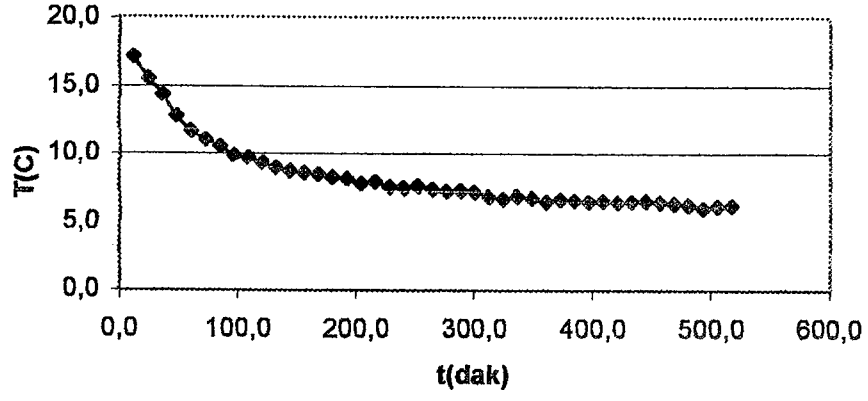
Şekil 4.16 Soğuk oda sıcaklığı-zaman grafiği



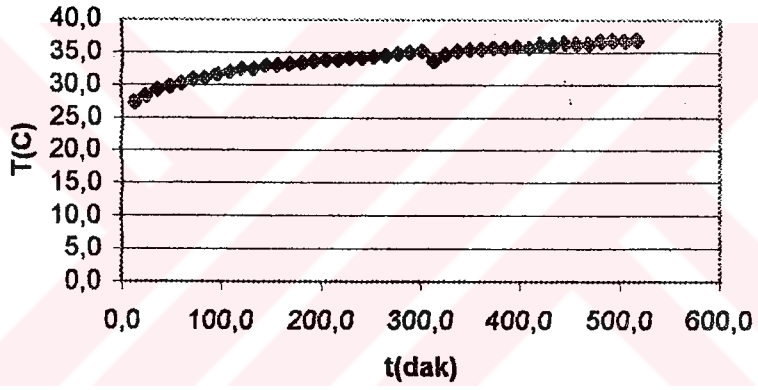
Şekil 4.17 Sıcakyüz1 sıcaklığı-zaman grafiği



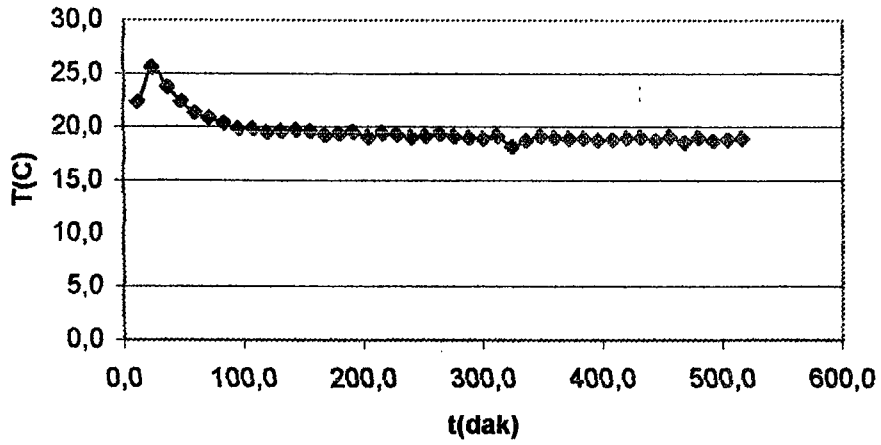
Şekil 4.18 Sıcakyüz2 sıcaklığı-zaman grafiği



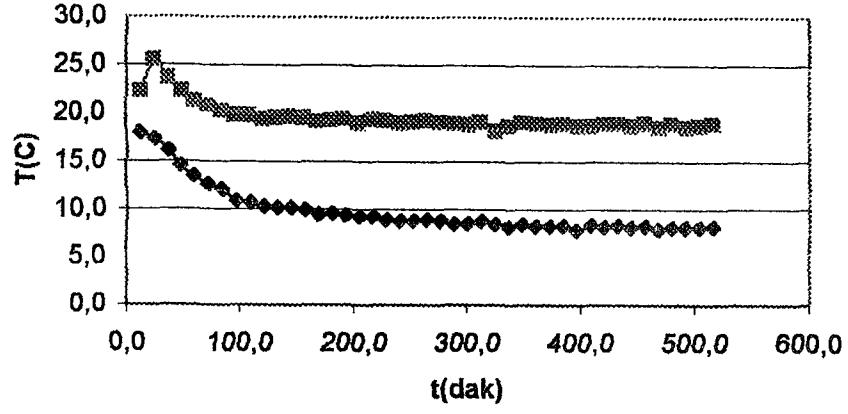
Şekil 4.19 Soğukyüz1 sıcaklığı-zaman grafiği



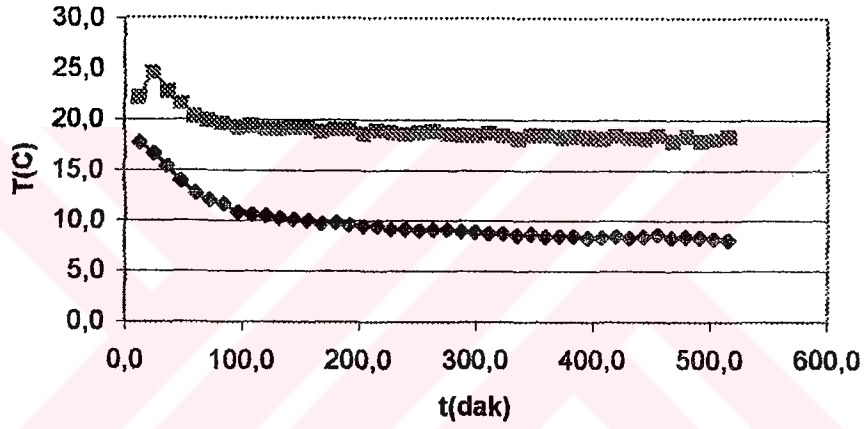
Şekil 4.20 Sıcak oda sıcaklığı-zaman grafiği



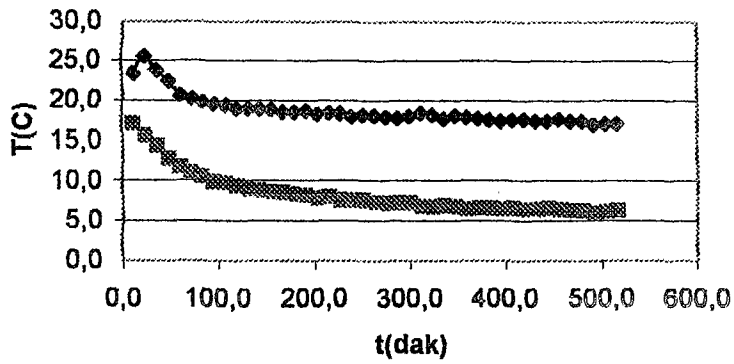
Şekil 4.21 Sıcakyüz3 sıcaklığı-zaman grafiği



Şekil 4.22 Sıcakyüz3-soğukyüz3 sıcaklıklarının karşılaştırılması



Şekil 4.23 Sıcakyüz2-soğukyüz2 sıcaklıklarının karşılaştırılması



Şekil 4.24 Sıcakyüz1 -soğukyüz1 sıcaklıklarının karşılaştırılması

### 4.3 Üç Katlı Gözenekli Levhannın Isı İletim Katsayısının Ölçümü

Çizelge 4.7 Termokupllardan alınan sıcaklık değerleri

Saat	TC1	TC2	TC3	TC4	TC5	TC6	TC7	TC8	TC9
14:01	46,79	15,15	14,43	3,70	30,64	30,25	14,82	46,94	31,84
14:13	47,27	15,01	14,29	3,43	30,41	30,12	14,73	45,81	31,70
14:25	47,88	14,77	13,97	3,31	30,41	30,12	14,41	46,05	31,70
14:37	46,89	15,00	14,28	3,17	30,13	29,73	14,69	46,16	31,45
14:49	46,65	15,38	14,60	2,92	30,08	29,60	15,04	44,34	31,31
15:01	47,49	14,86	14,02	2,66	30,10	29,59	14,55	44,93	31,30
15:13	46,38	15,60	14,89	2,65	29,85	29,45	15,28	45,65	31,04
15:25	46,96	14,20	13,48	2,62	29,03	29,43	13,92	46,36	31,14
15:37	47,19	14,57	13,87	2,49	28,72	29,29	14,26	44,28	31,00
15:49	46,46	14,81	14,16	2,36	28,65	29,16	14,52	46,10	30,88
16:01	46,94	14,30	13,57	2,23	28,77	29,15	14,00	44,87	30,86
16:13	46,33	14,30	13,60	2,10	28,51	28,90	14,02	45,97	30,61
16:25	46,68	14,04	13,30	1,96	28,58	29,01	13,74	45,35	30,73
16:37	46,82	14,05	13,43	1,85	28,42	28,90	13,86	45,24	30,61
16:49	47,05	14,42	13,69	1,84	28,34	28,76	14,13	46,08	30,48

Çizelge 4.8 Düzeltilmiş sıcaklık değerleri

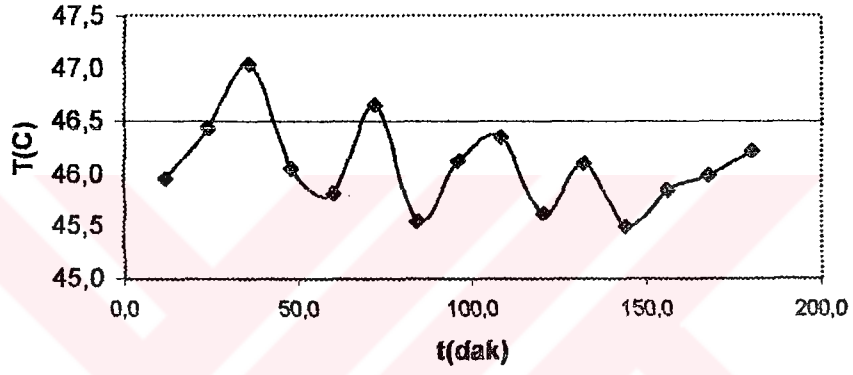
Saat	TC1	TC2	TC3	TC4	TC5	TC6	TC7	TC8	TC9
14:01	45,96	14,24	13,78	2,90	31,09	30,11	14,21	46,05	30,68
14:13	46,43	14,10	13,69	2,63	30,91	30,00	14,12	44,93	30,54
14:25	47,04	13,86	13,37	2,51	30,91	30,00	13,80	45,16	30,54
14:37	46,05	14,09	13,65	2,37	30,68	29,67	14,08	45,27	30,30
14:49	45,82	14,47	14,00	2,12	30,64	29,55	14,42	43,47	30,16
15:01	46,65	13,95	13,51	1,86	30,65	29,55	13,94	44,06	30,15
15:13	45,55	14,69	14,23	1,85	30,45	29,43	14,66	44,77	29,89
15:25	46,12	13,29	12,89	1,82	29,78	29,41	13,32	45,47	29,99
15:37	46,35	13,66	13,22	1,69	29,52	29,29	13,65	43,41	29,85
15:49	45,63	13,90	13,48	1,56	29,47	29,18	13,91	45,21	29,73
16:01	46,10	13,39	12,97	1,43	29,57	29,17	13,40	44,00	29,71
16:13	45,50	13,39	12,99	1,30	29,35	28,96	13,42	45,09	29,47
16:25	45,85	13,13	12,71	1,16	29,41	29,05	13,14	44,47	29,58
16:37	45,99	13,14	12,83	1,05	29,28	28,96	13,26	44,36	29,47
16:49	46,21	13,51	13,10	1,04	29,21	28,84	13,53	45,19	29,34

Çizelge4.9 Isıl iletkenliğin hesabı

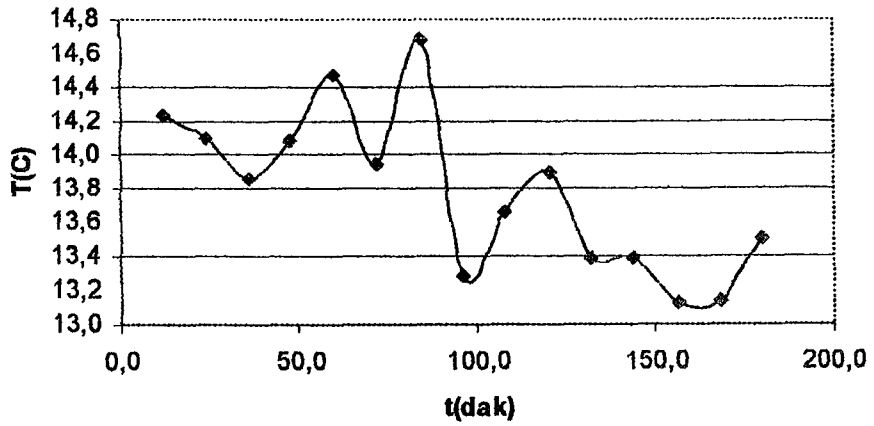
Saat	dT(2-9)	dT(3-6)	dT(5-7)	dTort	P(W)	A(m <sup>2</sup> )	L(m)	$\lambda$ (W/m.K)	K(w/m <sup>2</sup> K)
14:01	16,44	16,33	16,89	16,55	14,75	0,1444	0,0092	0,0568	6,17
14:13	16,45	16,31	16,79	16,51	14,75	0,1444	0,0092	0,0569	6,19
14:25	16,69	16,63	17,10	16,80	14,75	0,1444	0,0092	0,0559	6,08
14:37	16,21	16,02	16,60	16,27	14,75	0,1444	0,0092	0,0577	6,28
14:49	15,69	15,56	16,21	15,82	14,75	0,1444	0,0092	0,0594	6,46
15:01	16,20	16,03	16,71	16,32	14,75	0,1444	0,0092	0,0576	6,26
15:13	15,20	15,19	15,79	15,40	14,75	0,1444	0,0092	0,0610	6,63
15:25	16,70	16,52	16,46	16,56	14,75	0,1444	0,0092	0,0567	6,17
15:37	16,19	16,06	15,87	16,04	14,75	0,1444	0,0092	0,0586	6,37
15:49	15,84	15,70	15,56	15,70	14,75	0,1444	0,0092	0,0599	6,51

Çizelge 4.9'un devamı

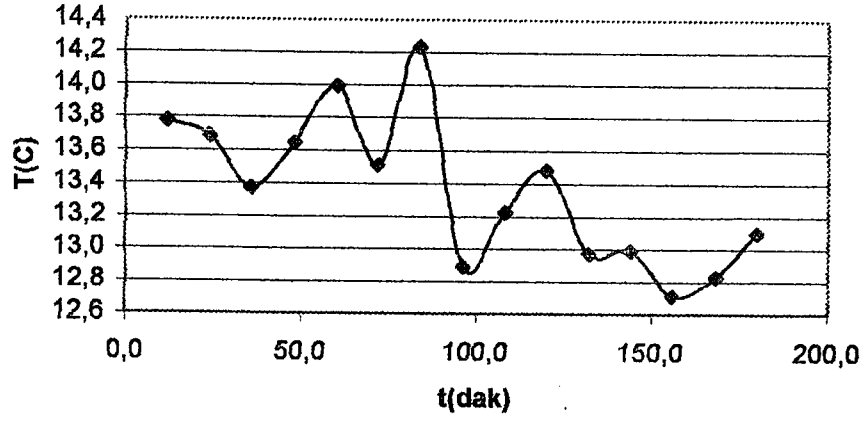
16:01	16,32	16,20	16,17	16,23	14,75	0,1444	0,0092	0,0579	6,29
16:13	16,08	15,97	15,93	15,99	14,75	0,1444	0,0092	0,0588	6,39
16:25	16,46	16,34	16,27	16,35	14,75	0,1444	0,0092	0,0575	6,25
16:37	16,33	16,13	16,02	16,16	14,75	0,1444	0,0092	0,0582	6,32
16:49	15,83	15,74	15,69	15,75	14,75	0,1444	0,0092	0,0597	6,48
							TOP	0,8725	94,84
							ORT	0,0582	6,32



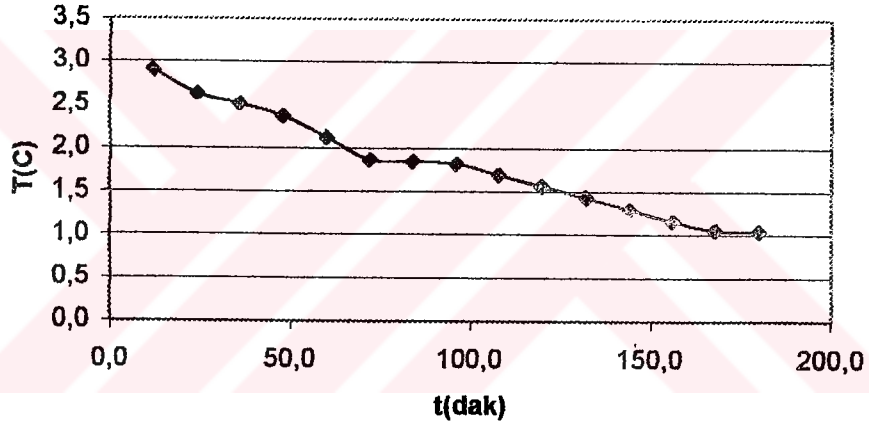
Şekil 4.25 Numune odası sıcaklığı-zaman grafiği



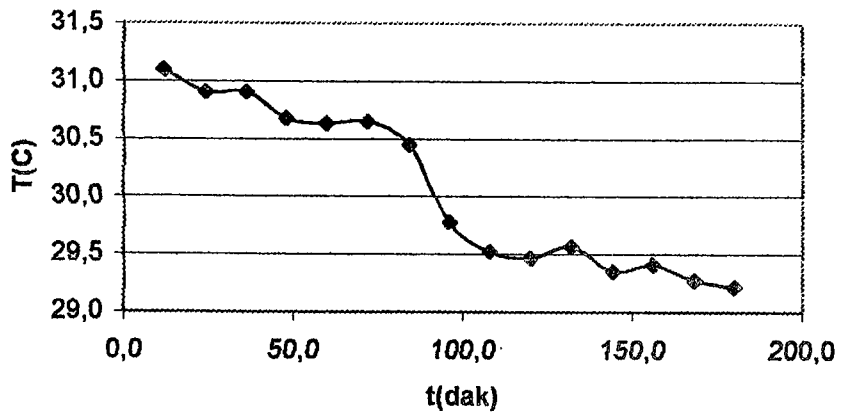
Şekil 4.26 Soğukyüz3 sıcaklığı-zaman grafiği



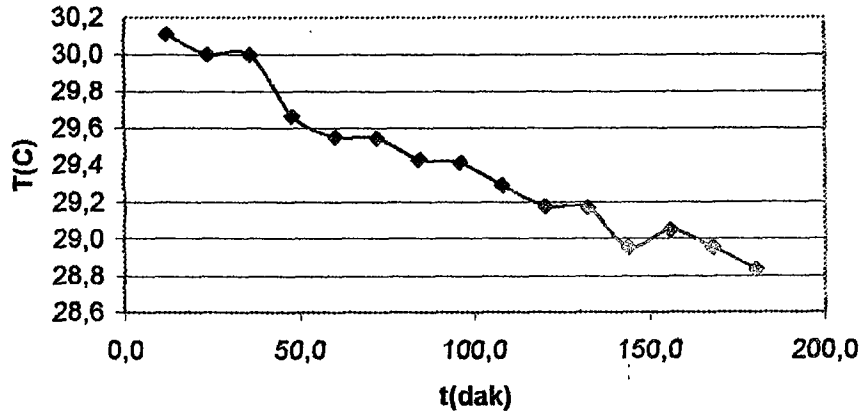
Şekil 4.27 Soğukyüz2 sıcaklığı-zaman grafiği



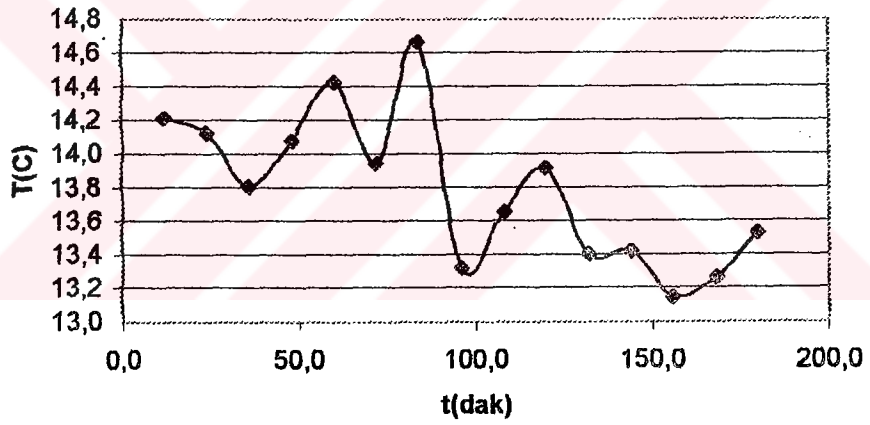
Şekil 4.28 Soğuk oda sıcaklığı-zaman grafiği



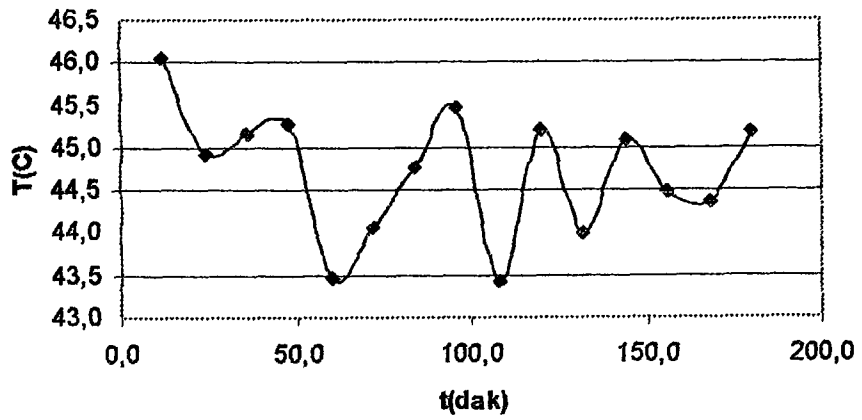
Şekil 4.29 Sıcakyüz1 sıcaklığı-zaman grafiği



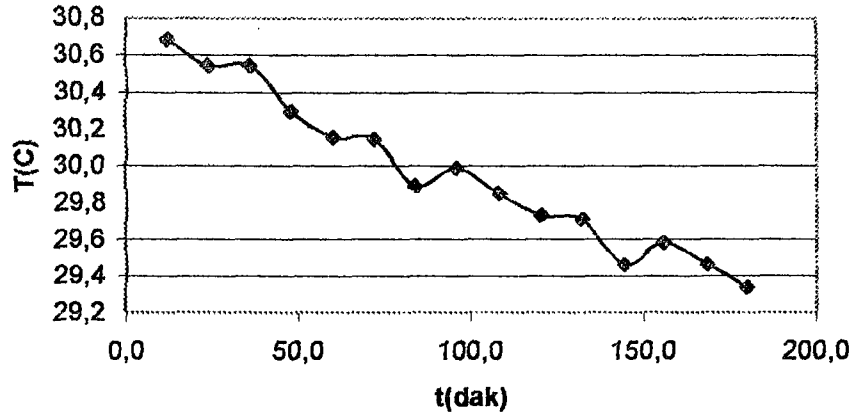
Şekil 4.30 Sıcakyüz2 sıcaklığı-zaman grafiği



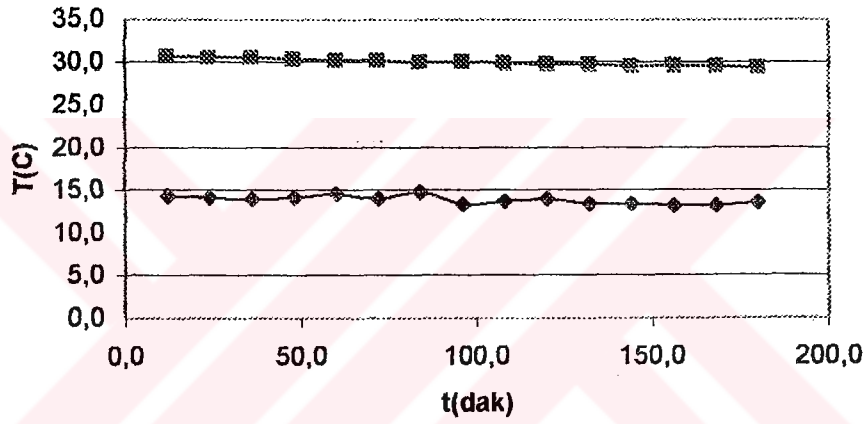
Şekil 4.31 Soğukyüz1 sıcaklığı-zaman grafiği



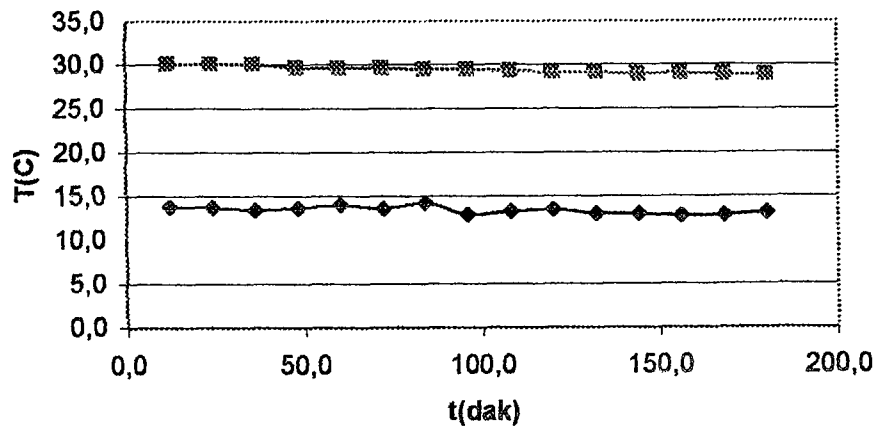
Şekil 4.32 Sıcak oda sıcaklığı-zaman grafiği



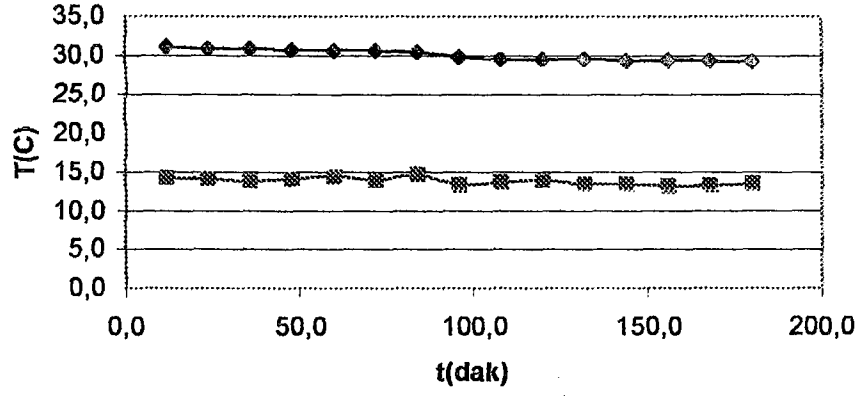
Şekil 4.33 Sıcakyüz3 sıcaklığı-zaman grafiği



Şekil 4.34 Sıcakyüz3-soğukyüz3 sıcaklıklarının karşılaştırılması



Şekil 4.35 Sıcakyüz2-soğukyüz2 sıcaklıklarının karşılaştırılması



Şekil 4.36 Sıcak yüz-soğuk yüz sıcaklıklarının karşılaştırılması

#### 4.4 Dört Katlı Gözenekli Levhanın Isı İletim Katsayısının Ölçümü

Çizelge 4.10 Termokupllardan alınan sıcaklık değerleri

Saat	TC1	TC2	TC3	TC4	TC5	TC6	TC7	TC8	TC9
10:25	38,38	-	8,41	3,05	29,85	29,23	7,53	40,09	-
10:37	38,60	-	8,13	2,90	29,70	28,95	7,26	38,72	-
10:49	38,86	-	10,64	4,66	29,59	28,96	9,51	39,22	-
11:01	39,09	-	13,86	6,51	30,45	29,95	12,37	40,43	-
11:13	39,16	-	14,93	7,21	31,16	30,78	13,44	39,41	-
11:25	39,36	-	15,51	7,66	31,73	31,36	14,01	38,51	-
11:37	39,47	-	9,64	3,79	31,35	30,72	8,77	40,20	-
11:49	39,55	-	8,61	3,25	30,43	29,68	7,74	39,92	-
12:01	39,64	-	8,07	2,84	29,89	29,14	7,32	38,67	-
12:13	39,91	-	11,58	5,48	29,67	28,92	10,46	39,66	-
12:25	40,00	-	14,05	6,58	30,39	29,89	12,56	40,00	-
12:37	40,19	-	14,98	7,25	31,32	30,70	13,48	38,59	-

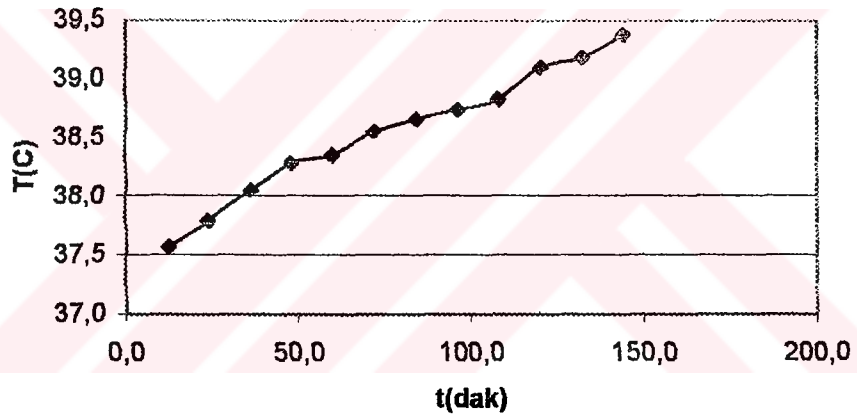
Çizelge 4.11 Düzeltilmiş sıcaklık değerleri

Saat	TC1	TC2	TC3	TC4	TC5	TC6	TC7	TC8	TC9
10:25	37,57	-	6,57	2,25	30,45	29,24	7,03	39,27	-
10:37	37,79	-	6,30	2,10	30,33	29,00	6,77	37,92	-
10:49	38,05	-	8,53	3,85	30,24	29,01	8,98	38,41	-
11:01	38,28	-	11,36	5,70	30,94	29,85	11,80	39,61	-
11:13	38,35	-	12,41	6,40	31,52	30,56	12,85	38,60	-
11:25	38,55	-	12,98	6,85	31,98	31,06	13,41	37,71	-
11:37	38,66	-	7,79	2,99	31,67	30,51	8,25	39,38	-
11:49	38,74	-	6,78	2,45	30,92	29,62	7,24	39,10	-
12:01	38,83	-	6,36	2,04	30,48	29,16	6,83	37,87	-
12:13	39,10	-	9,47	4,67	30,30	28,97	9,92	38,84	-
12:25	39,19	-	11,54	5,77	30,89	29,80	11,98	39,18	-
12:37	39,37	-	12,45	6,44	31,65	30,49	12,89	37,79	-

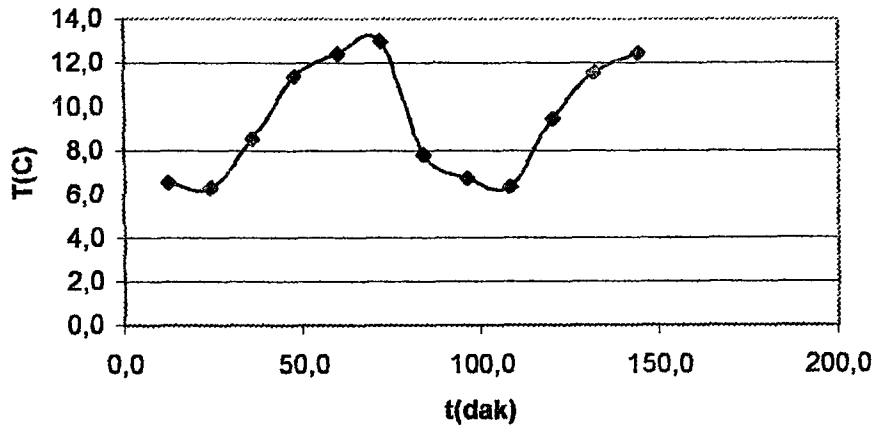
30. YÜZLÜK SÖZLEŞİMİN KURULUŞU  
MÜHÜRÜMÜZLE ONAYLANMIŞTIR.

Çizelge 4.12 Isıl iletkenliğin hesabı

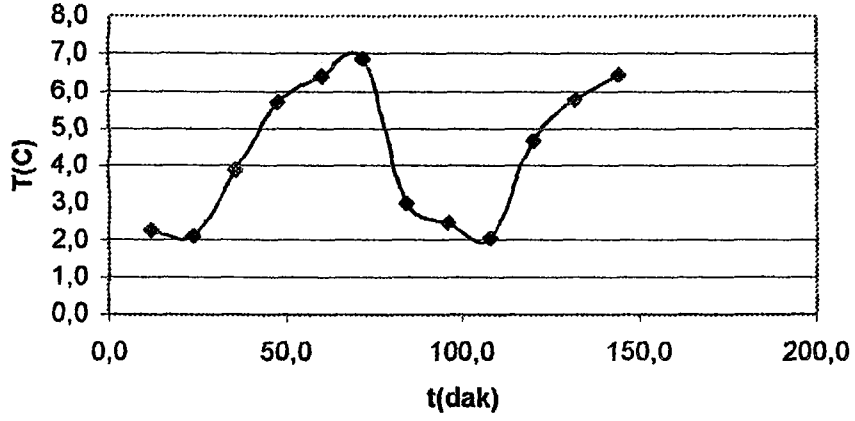
Saat	dT(2-9)	dT(3-6)	dT(5-7)	dTort	P(W)	A(m <sup>2</sup> )	L(m)	$\lambda$ (W/m.K)	K(W/m <sup>2</sup> K)
10:25	0,00	22,67	23,42	23,04	14,07	0,1444	0,0121	0,0512	4,23
10:37	0,00	22,70	23,56	23,13	14,07	0,1444	0,0121	0,0510	4,21
10:49	0,00	20,48	21,25	20,87	14,07	0,1444	0,0121	0,0565	4,67
11:01	0,00	18,50	19,14	18,82	14,07	0,1444	0,0121	0,0627	5,18
11:13	0,00	18,15	18,67	18,41	14,07	0,1444	0,0121	0,0641	5,29
11:25	0,00	18,08	18,57	18,33	14,07	0,1444	0,0121	0,0643	5,32
11:37	0,00	22,72	23,42	23,07	14,07	0,1444	0,0121	0,0511	4,22
11:49	0,00	22,85	23,68	23,26	14,07	0,1444	0,0121	0,0507	4,19
12:01	0,00	22,80	23,65	23,23	14,07	0,1444	0,0121	0,0508	4,20
12:13	0,00	19,51	20,39	19,95	14,07	0,1444	0,0121	0,0591	4,89
12:25	0,00	18,26	18,91	18,58	14,07	0,1444	0,0121	0,0635	5,24
12:37	0,00	18,04	18,76	18,40	14,07	0,1444	0,0121	0,0641	5,30
							TOP	0,6890	56,94
							ORT	0,0674	4,76



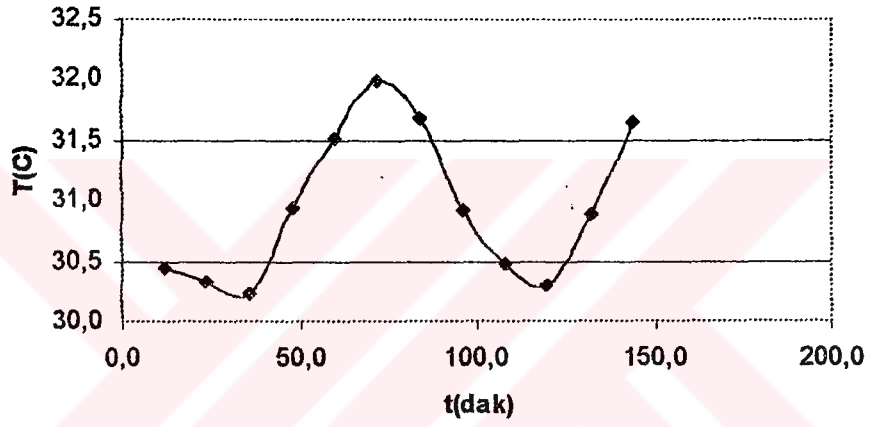
Şekil 4.37 Numune odası sıcaklığı-zaman grafiği



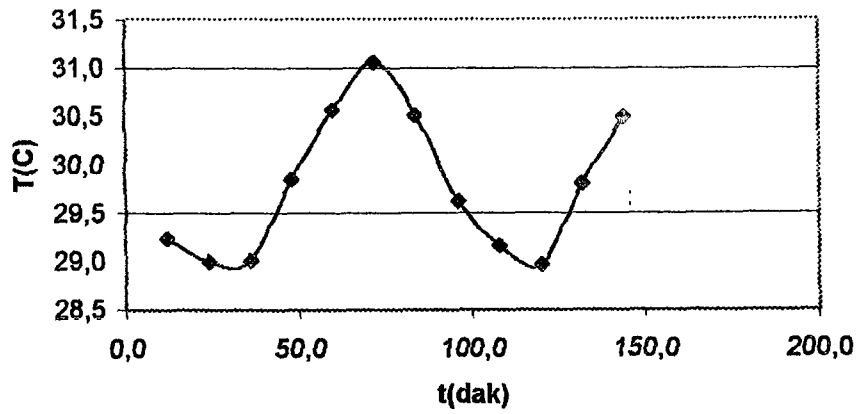
Şekil 4.38 Soğukyüz2 sıcaklığı-zaman grafiği



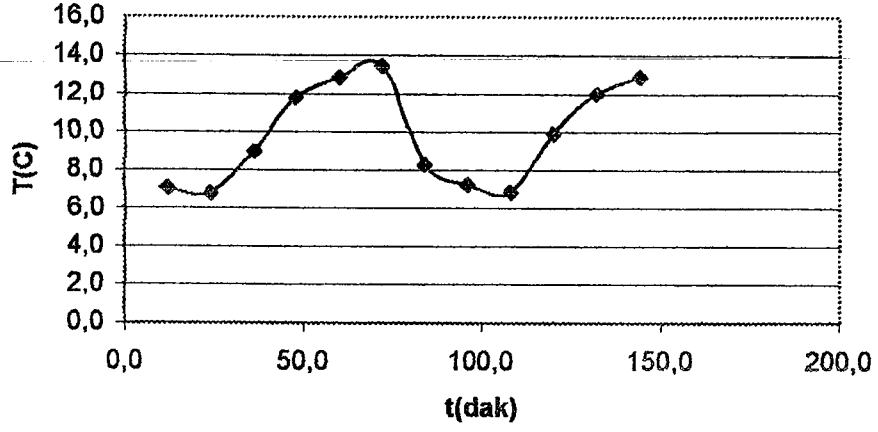
Şekil 4.39 Soğuk oda sıcaklığı-zaman grafiği



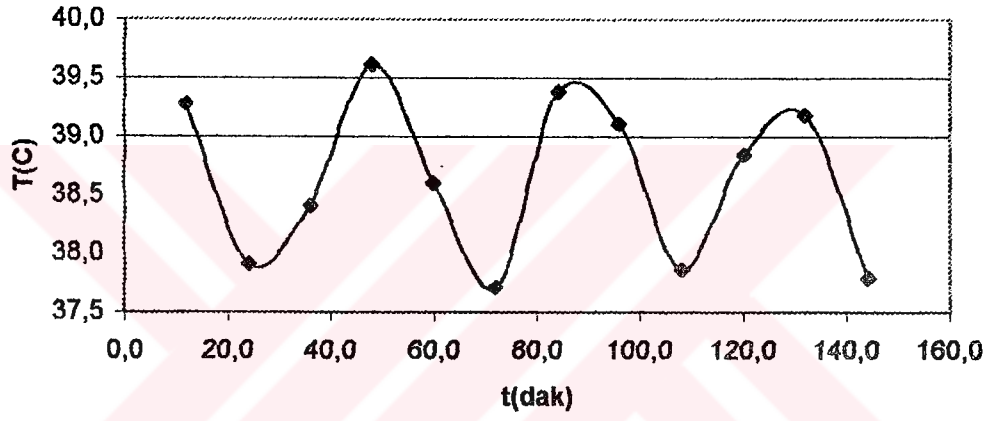
Şekil 4.40 Sıcakyüz1 sıcaklığı-zaman grafiği



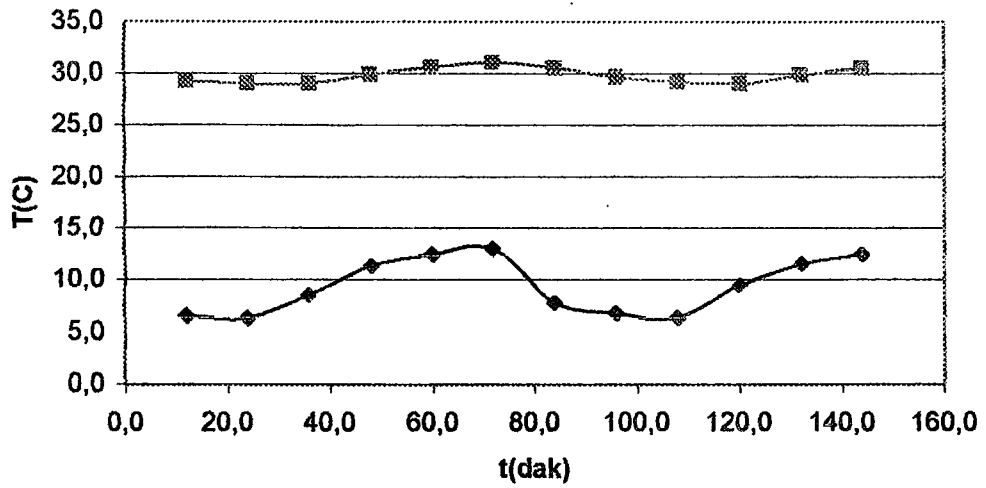
Şekil 4.41 Sıcakyüz2 sıcaklığı-zaman grafiği



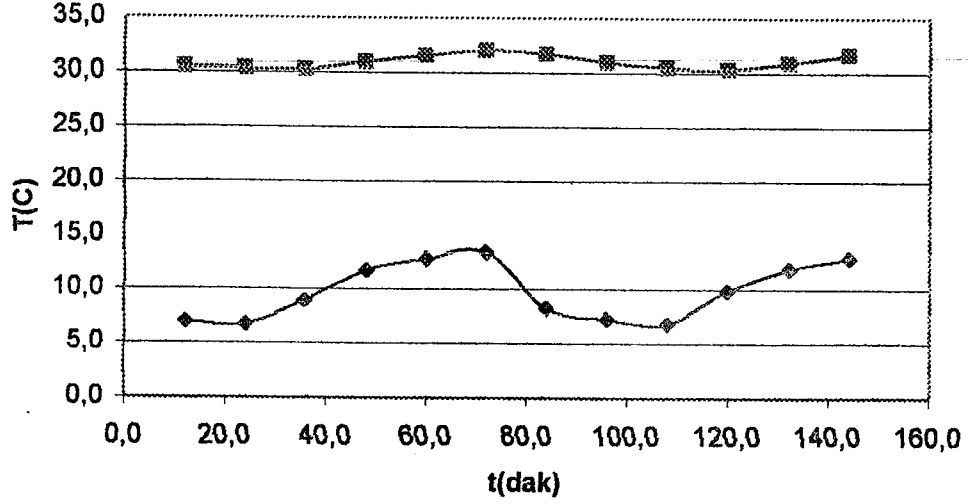
Şekil 4.42 Soğukyüz1 sıcaklığı-zaman grafiği



Şekil 4.43 Sıcak oda sıcaklığı-zaman grafiği



Şekil 4.44 Sıcakyüz2-soğukyüz2 sıcaklıklarının karşılaştırılması



Şekil 4.45 Sıcakyüzl-soğukyüzl sıcaklıklarının karşılaştırılması

#### 4.5 Beş Katlı Gözenekli Levhanın Isı İletim Katsayısının Ölçümü

Çizelge 4.13 Termokupllardan alınan sıcaklık değerleri

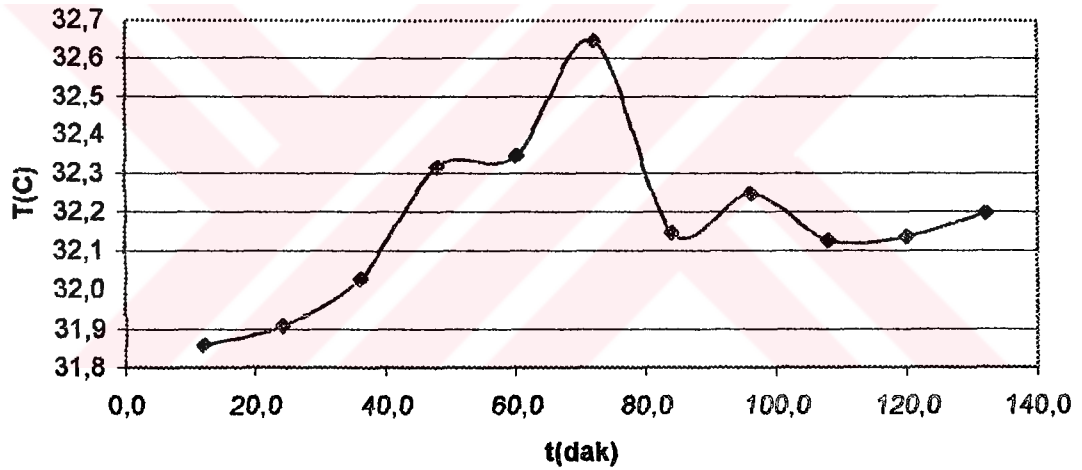
Saat	TC1	TC2	TC3	TC4	TC5	TC6	TC7	TC8	TC9
14:15	32,65	-	7,63	1,53	25,56	25,56	6,76	32,27	-
14:27	32,70	-	7,43	1,45	25,74	25,74	6,56	32,57	-
14:39	32,82	-	8,67	1,70	25,49	25,49	7,55	32,69	-
14:51	33,11	-	12,21	4,86	26,29	26,29	11,34	32,86	-
15:03	33,14	-	13,48	5,51	27,06	27,69	12,48	33,13	-
15:15	33,44	-	14,29	6,07	27,75	28,63	13,17	33,31	-
15:27	32,94	-	10,17	2,82	27,74	28,36	9,05	33,66	-
15:39	33,04	-	8,77	2,18	26,71	26,84	7,65	34,00	-
15:51	32,92	-	8,28	1,80	26,21	26,21	7,16	34,12	-
16:03	32,93	-	7,79	1,57	25,97	25,72	6,79	34,14	-
16:15	32,99	-	9,60	2,49	25,90	25,40	8,46	34,31	-

Çizelge 4.14 Düzeltilmiş sıcaklık değerleri

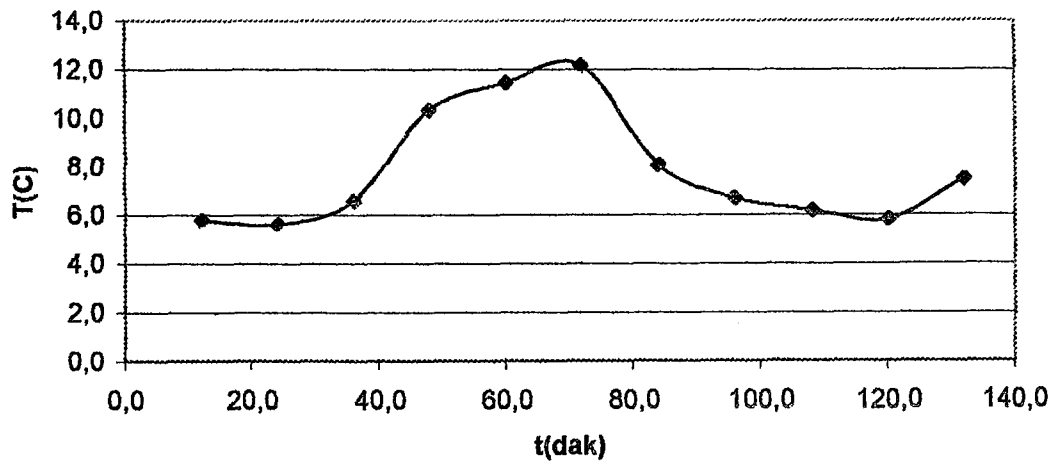
Saat	TC1	TC2	TC3	TC4	TC5	TC6	TC7	TC8	TC9
14:15	31,86	-	5,81	0,73	26,94	26,10	6,27	31,54	-
14:27	31,91	-	5,61	0,65	27,09	26,25	6,08	31,83	-
14:39	32,03	-	6,59	0,90	26,89	26,04	7,05	31,95	-
14:51	32,32	-	10,34	4,05	27,54	26,72	10,78	32,12	-
15:03	32,35	-	11,46	4,70	28,17	27,92	11,90	32,39	-
15:15	32,65	-	12,15	5,26	28,73	28,73	12,58	32,56	-
15:27	32,15	-	8,07	2,02	28,72	28,49	8,53	32,91	-
15:39	32,25	-	6,69	1,38	27,88	27,19	7,15	33,25	-
15:51	32,13	-	6,20	1,00	27,47	26,66	6,67	33,37	-
16:03	32,14	-	5,84	0,77	27,28	26,24	6,30	33,39	-
16:15	32,20	-	7,49	1,69	27,22	25,96	7,95	33,55	-

Çizelge 4.15 Isıl iletkenliğin hesabı

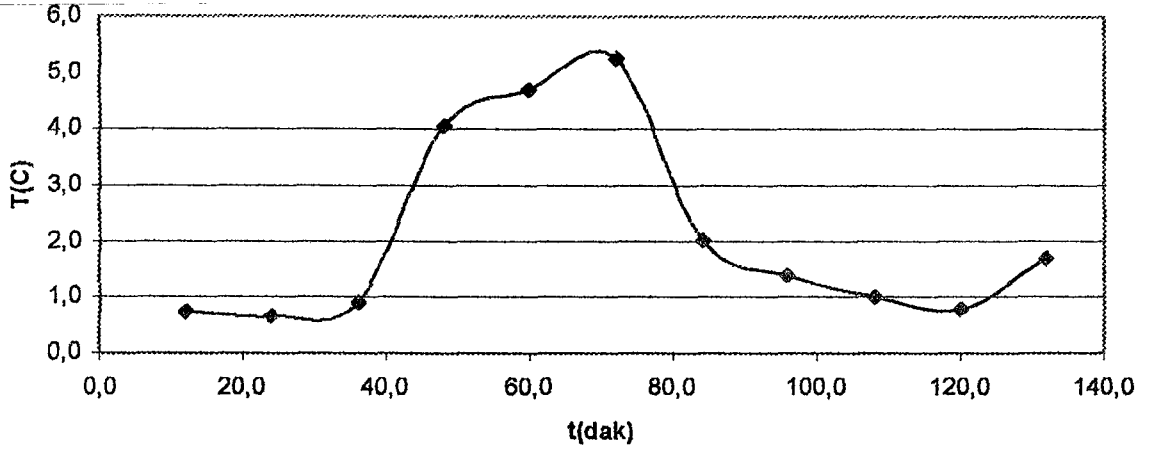
Saat	dT(2-9)	dT(3-6)	dT(5-7)	dTort	P(W)	A(m <sup>2</sup> )	L(m)	$\lambda$ (W/m.K)	K(w/m <sup>2</sup> .K)
14:15	-	20,29	20,67	20,48	10,31	0,1444	0,0150	0,0523	3,48
14:27	-	20,65	21,01	20,83	10,31	0,1444	0,0150	0,0514	3,43
14:39	-	19,45	19,83	19,64	10,31	0,1444	0,0150	0,0545	3,63
14:51	-	16,39	16,76	16,57	10,31	0,1444	0,0150	0,0646	4,31
15:03	-	16,46	16,27	16,36	10,31	0,1444	0,0150	0,0654	4,36
15:15	-	16,58	16,15	16,36	10,31	0,1444	0,0150	0,0654	4,36
15:27	-	20,42	20,20	20,31	10,31	0,1444	0,0150	0,0527	3,51
15:39	-	20,51	20,73	20,62	10,31	0,1444	0,0150	0,0519	3,46
15:51	-	20,45	20,81	20,63	10,31	0,1444	0,0150	0,0519	3,46
16:03	-	20,40	20,97	20,69	10,31	0,1444	0,0150	0,0517	3,45
16:15	-	18,48	19,27	18,87	10,31	0,1444	0,0150	0,0567	3,78
							TOP	0,6186	41,24
							ORT	0,0562	3,75



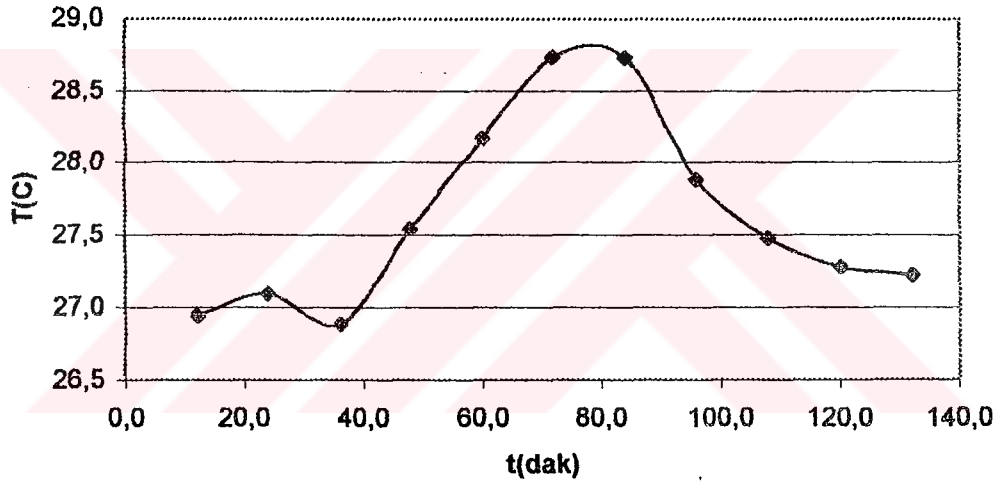
Şekil 4.46 Numune odası sıcaklığı-zaman grafiği



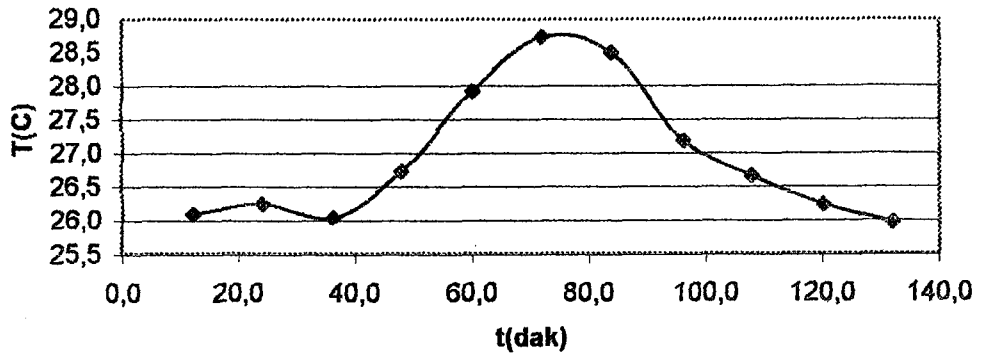
Şekil 4.47 Soğukyüz2 sıcaklığı-zaman grafiği



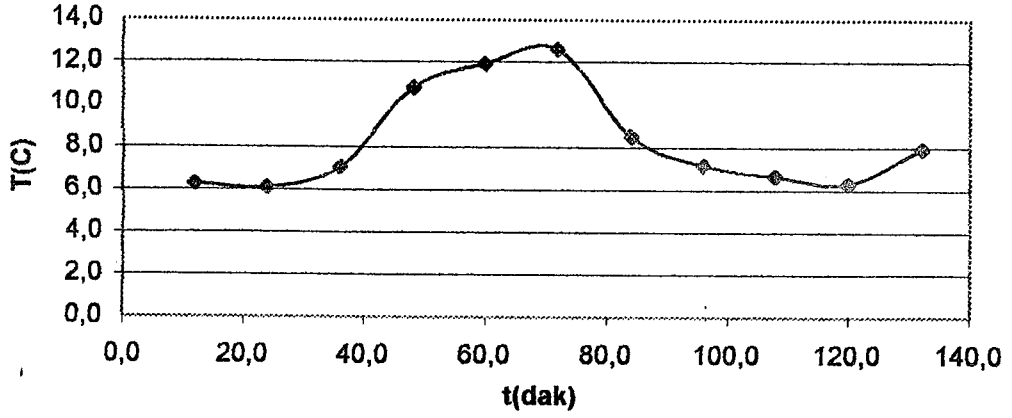
Şekil 4.48 Soğuk oda sıcaklığı-zaman grafiği



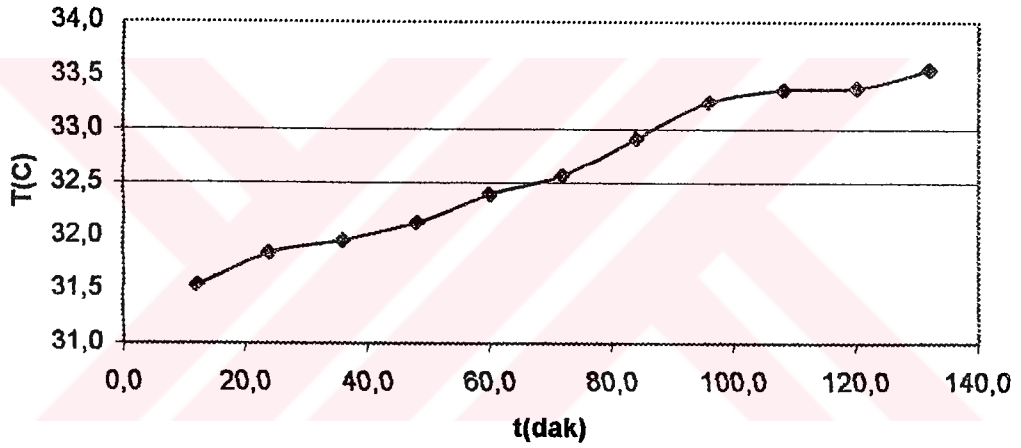
Şekil 4.49 Sıcakyüz1 sıcaklığı-zaman grafiği



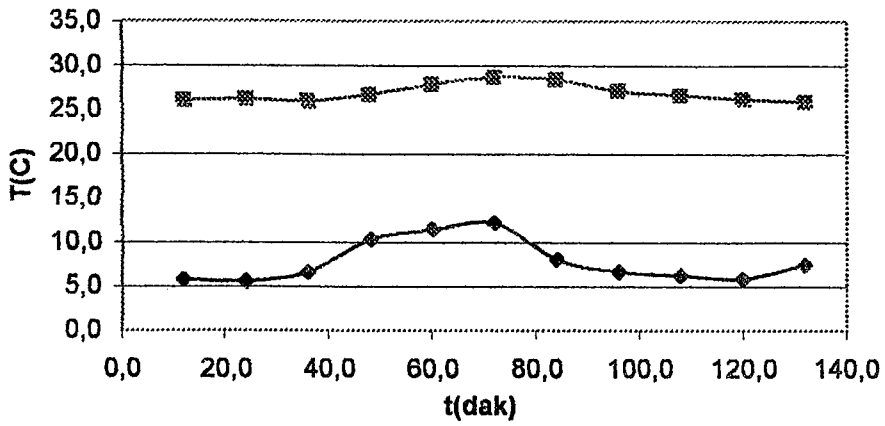
Şekil 4.50 Sıcakyüz2 sıcaklığı-zaman grafiği



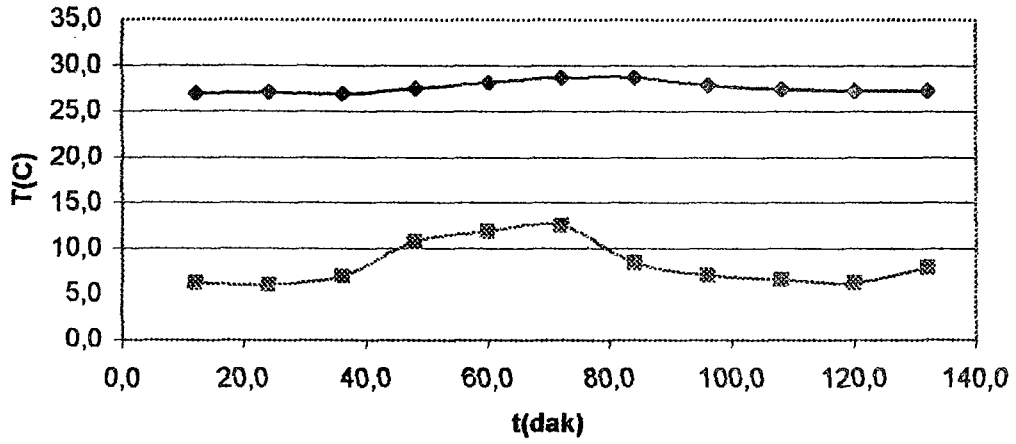
Şekil 4.51 Soğukyüz1 sıcaklığı-zaman grafiği



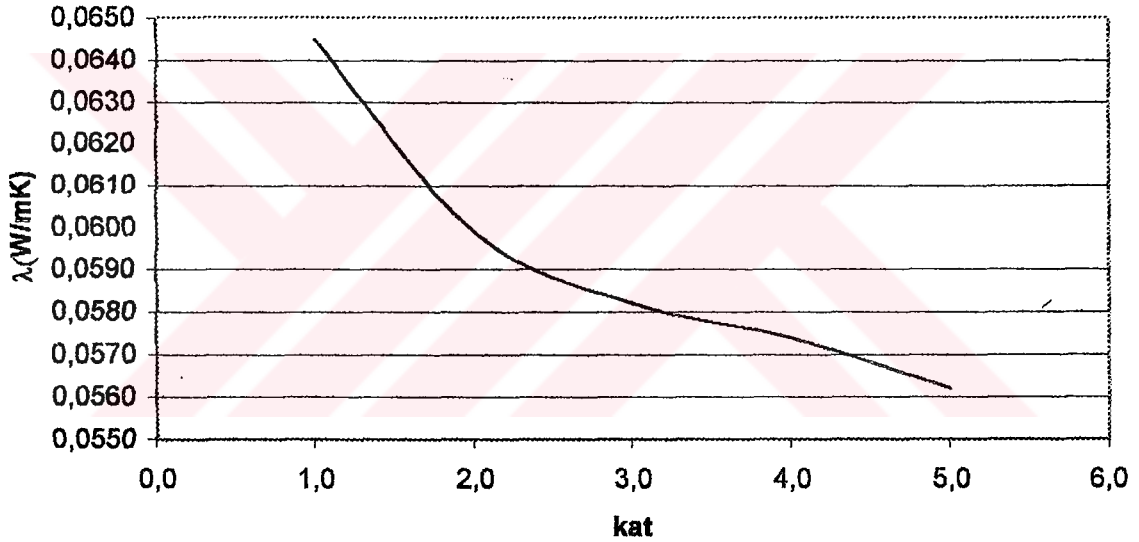
Şekil 4.52 Sıcak oda sıcaklığı-zaman grafiği



Şekil 4.53 Sıcakyüz2-soğukyüz2 sıcaklıklarının karşılaştırılması

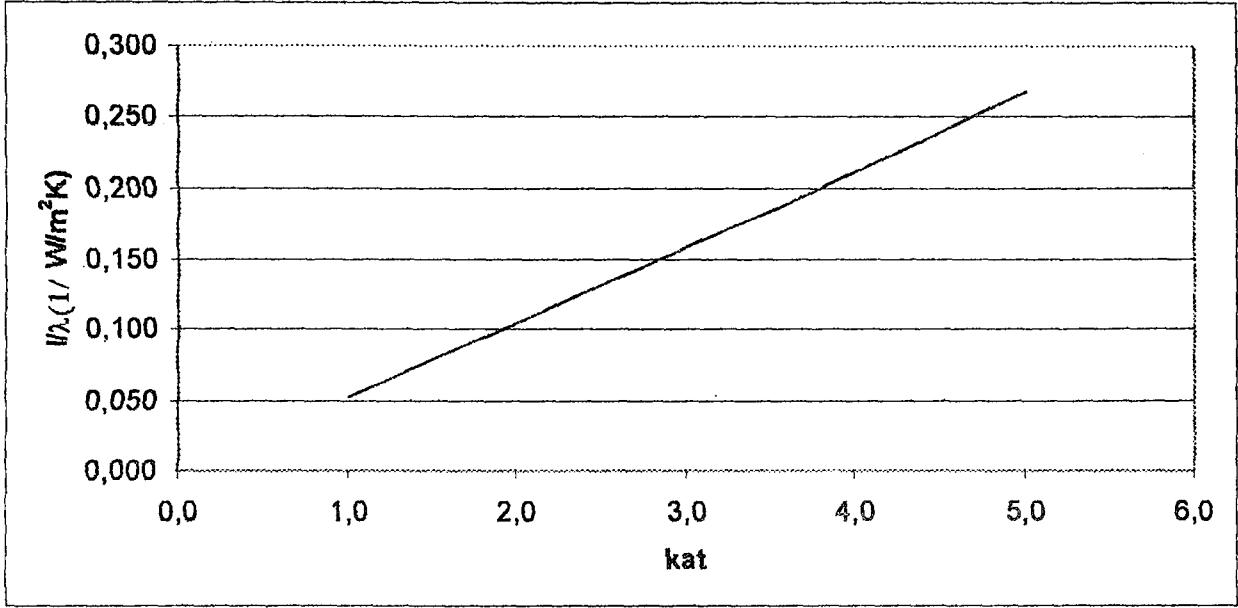


Şekil 4.54 Sıcakyüz1-soğukyüz1 sıcaklıklarının karşılaştırılması



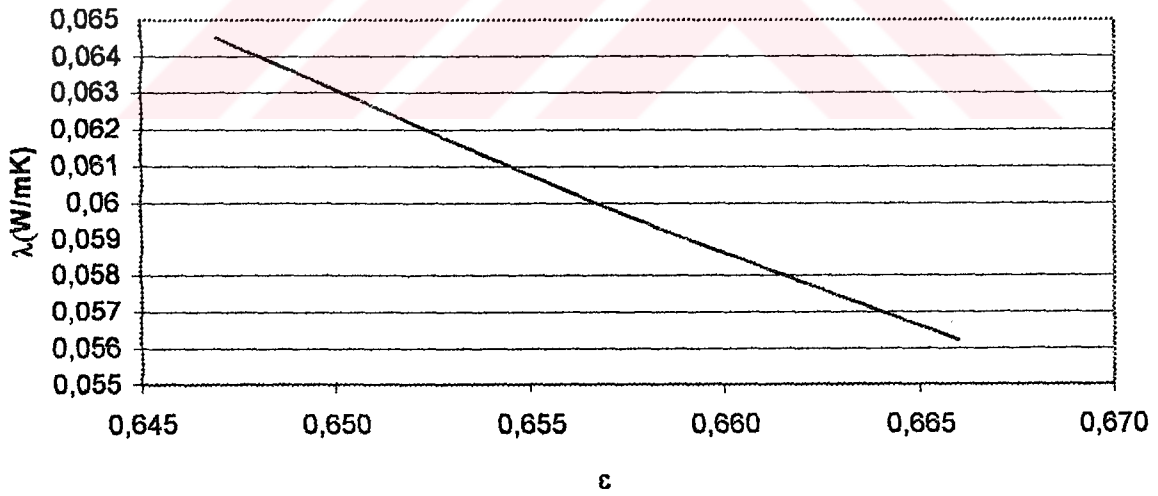
Şekil 4.55 Levha kat adedi-ısı iletkenlik

Kat adedi arttırıldıkça ısı iletkenlik düşmektedir. Şekil 4.55'teki grafikten belli bir kat adedine ulaştıktan sonra kat adedini arttırarak levhayı kalınlaştırmanın ısı iletkenliği düşüren bir etki yapmayacağı görülmektedir. Buradan imal edilecek yalıtım malzemelerinin optimum bir değerden sonra artık kalınlaştırılmasının gereksiz olduğu sonucu çıkarılabilir. Ve bu sonuca göre de yalıtım malzemeleri üretirken hammadde tasarrufuna gidilebileceği söylenebilir.



Şekil 4.56 Levha kat adedi-ısı direnç

Isıl direncin levha kalınlaştıkça doğrusal olarak artması numunenin her katta homojen ve benzer bir yapıda olduğunu göstermektedir.



Şekil 4.57 Gözeneklilik- ısı iletkenlik

Gözeneklilik arttıkça ısı iletim katsayısı düşmektedir. Bu azalmanın ufak bir gözeneklilik değişiminde dahi oldukça yüksek olduğu görülmektedir. Dolayısıyla gözeneklilik malzemenin ısı iletkenliğine etki eden oldukça önemli bir kavramdır.

#### 4.6 Sert Polistren Köpük Malzemenin Isı İletim Katsayısının Ölçümü

##### 4.6.1 A numunesinin ısı iletim katsayısının tayini

Çizelge 4.16 Termokupllardan alınan sıcaklık değerleri

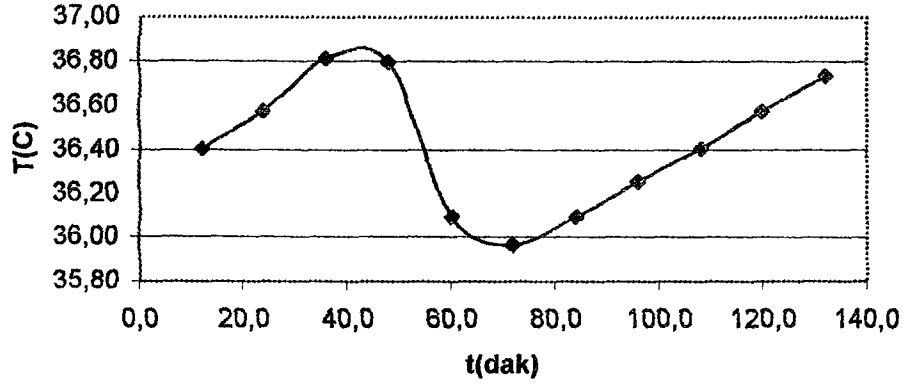
	TC1	TC2	TC3	TC4	TC5	TC6	TC7	TC8	TC9
14:32	37,21	-	4,84	2,85	33,71	35,59	4,96	34,78	-
14:44	37,38	-	4,76	2,77	34,11	35,75	4,76	33,37	-
14:56	37,62	-	4,76	2,77	34,22	35,75	4,76	33,25	-
15:08	37,60	-	4,61	2,62	33,96	35,61	4,61	33,10	-
15:20	36,90	-	4,40	2,41	32,94	34,70	4,40	33,13	-
15:32	36,77	-	4,26	2,39	32,92	34,69	4,38	33,12	-
15:44	36,90	-	4,15	2,28	33,17	34,93	4,27	33,13	-
15:56	37,06	-	4,06	2,07	33,55	35,20	4,18	33,06	-
16:08	37,21	-	4,09	1,98	33,94	35,47	4,09	32,96	-
16:20	37,38	-	4,02	2,03	33,98	35,63	4,02	33,13	-
16:32	37,54	-	4,05	2,06	33,78	35,43	4,05	33,16	-

Çizelge 4.17 Düzeltilmiş sıcaklık değerleri

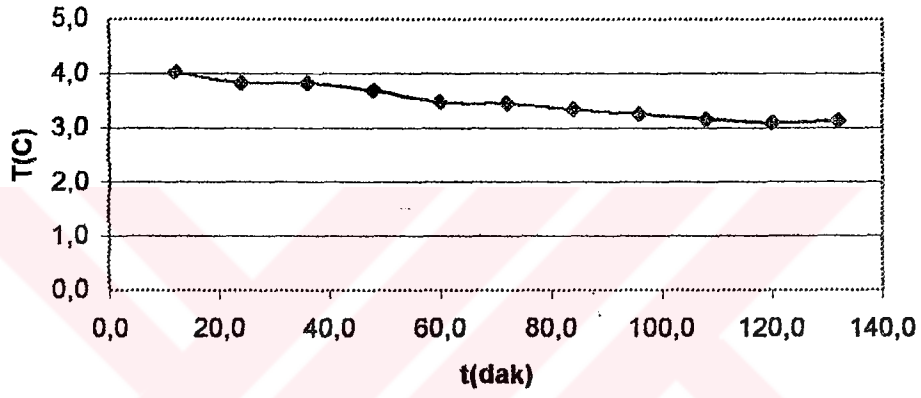
	TC1	TC2	TC3	TC4	TC5	TC6	TC7	TC8	TC9
14:32	36,40	-	4,03	2,05	33,60	34,68	4,50	34,02	-
14:44	36,57	-	3,83	1,97	33,93	34,81	4,31	32,62	-
14:56	36,81	-	3,83	1,97	34,02	34,81	4,31	32,51	-
15:08	36,79	-	3,68	1,82	33,81	34,69	4,16	32,36	-
15:20	36,09	-	3,47	1,61	32,97	33,91	3,95	32,39	-
15:32	35,97	-	3,45	1,59	32,96	33,91	3,93	32,38	-
15:44	36,09	-	3,34	1,48	33,16	34,11	3,82	32,39	-
15:56	36,25	-	3,25	1,27	33,47	34,34	3,74	32,32	-
16:08	36,40	-	3,17	1,18	33,79	34,57	3,65	32,22	-
16:20	36,57	-	3,10	1,23	33,82	34,71	3,58	32,39	-
16:32	36,73	-	3,13	1,26	33,66	34,54	3,61	32,42	-

Çizelge 4.18 Isıl iletkenliğin hesabı

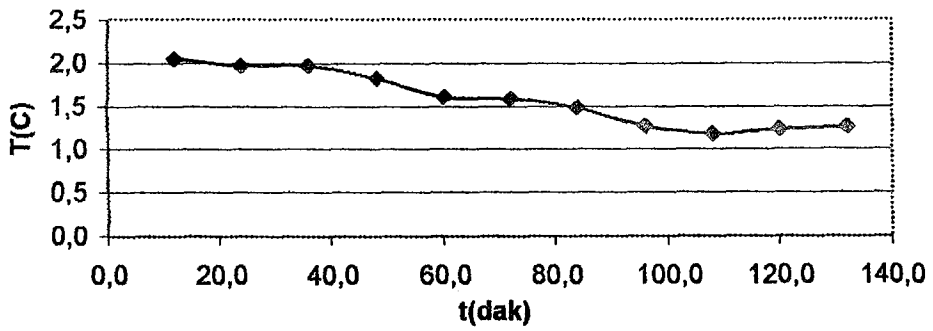
Saat	dT(2-9)	dT(3-6)	dT(5-7)	dTort	P(W)	A(m <sup>2</sup> )	L(m)	$\lambda$ (W/m.K)	K(W/m <sup>2</sup> .K)
14:32	-	30,65	29,10	29,87	7,25	0,16	0,03	0,0455	0,66
14:44	-	30,98	29,62	30,30	7,25	0,16	0,03	0,0449	0,67
14:56	-	30,98	29,71	30,35	7,25	0,16	0,03	0,0448	0,67
15:08	-	31,01	29,65	30,33	7,25	0,16	0,03	0,0448	0,67
15:20	-	30,44	29,02	29,73	7,25	0,16	0,03	0,0457	0,66
15:32	-	30,45	29,02	29,74	7,25	0,16	0,03	0,0457	0,66
15:44	-	30,77	29,34	30,05	7,25	0,16	0,03	0,0452	0,66
15:56	-	31,09	29,73	30,41	7,25	0,16	0,03	0,0447	0,67
16:08	-	31,41	30,14	30,77	7,25	0,16	0,03	0,0442	0,68
16:20	-	31,61	30,24	30,93	7,25	0,16	0,03	0,0440	0,68
16:32	-	31,41	30,05	30,73	7,25	0,16	0,03	0,0442	0,68
							TOP	0,4937	7,35
							ORT	0,0449	0,67



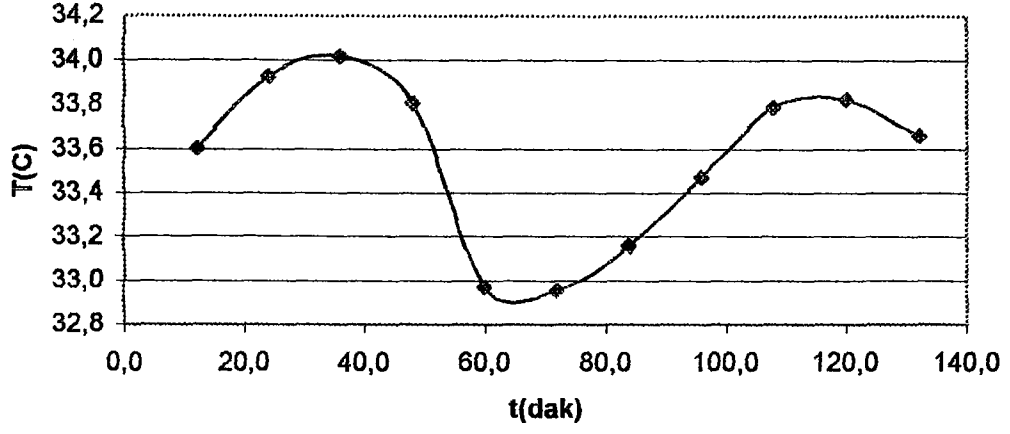
Şekil 4.58 Numune odası sıcaklığı-zaman grafiği



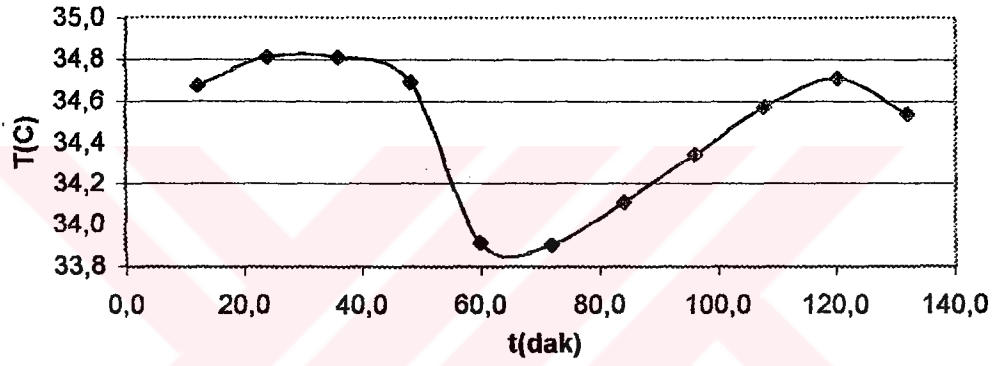
Şekil 4.59 Soğukyüz2 sıcaklığı-zaman grafiği



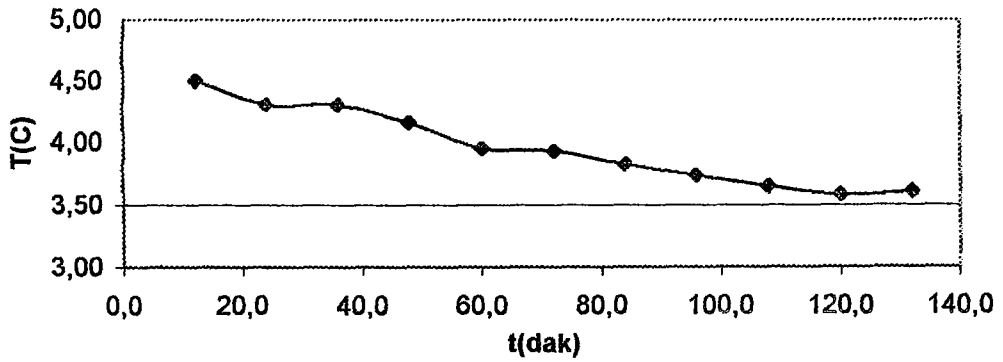
Şekil 4.60 Soğuk oda sıcaklığı-zaman grafiği



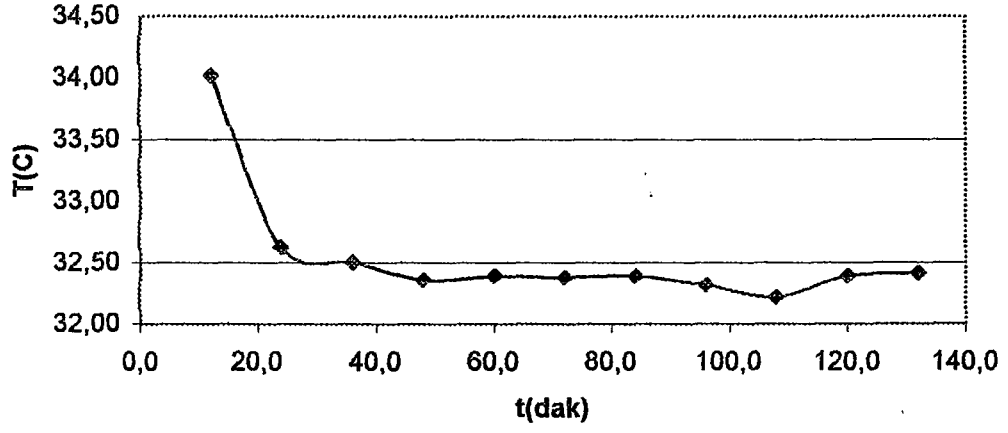
Şekil 4.61 Sıcakyüz1 sıcaklığı-zaman grafiği



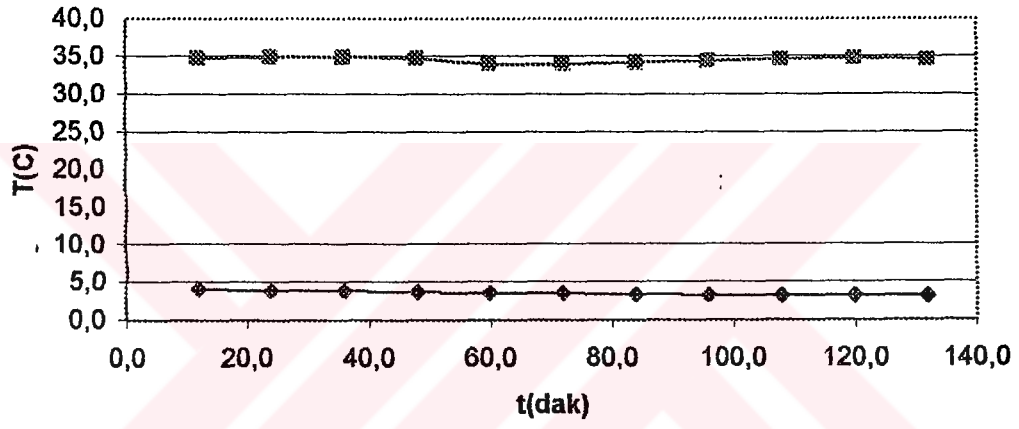
Şekil 4.62 Sıcakyüz2 sıcaklığı-zaman grafiği



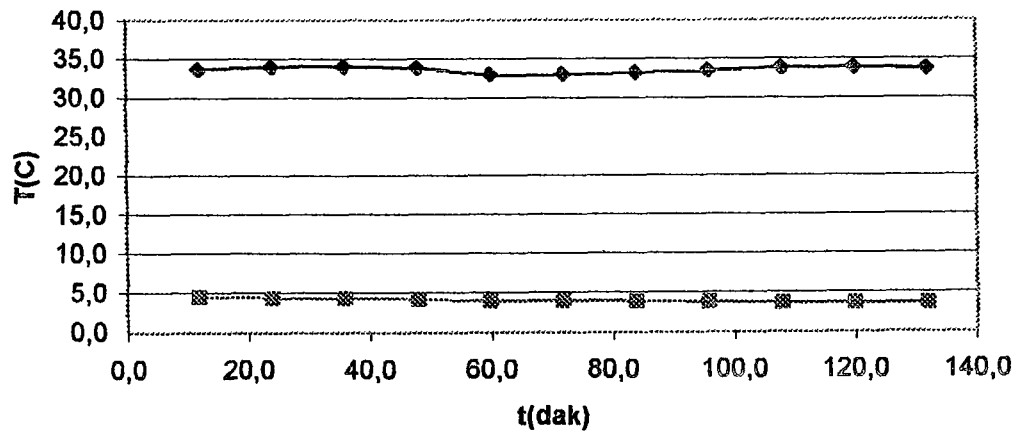
Şekil 4.63 Soğukyüz1 sıcaklığı-zaman grafiği



Şekil 4.64 Sıcak oda sıcaklığı-zaman grafiği



Şekil 4.65 Sıcakyüz2-soğukyüz2 sıcaklıklarının karşılaştırılması



Şekil 4.66 Sıcakyüz1-soğukyüz1 sıcaklıklarının karşılaştırılması

#### 4.6.2 B numunesinin ısı iletim katsayısının tayini

Çizelge 4.19 Termokupllardan alınan sıcaklık değerleri

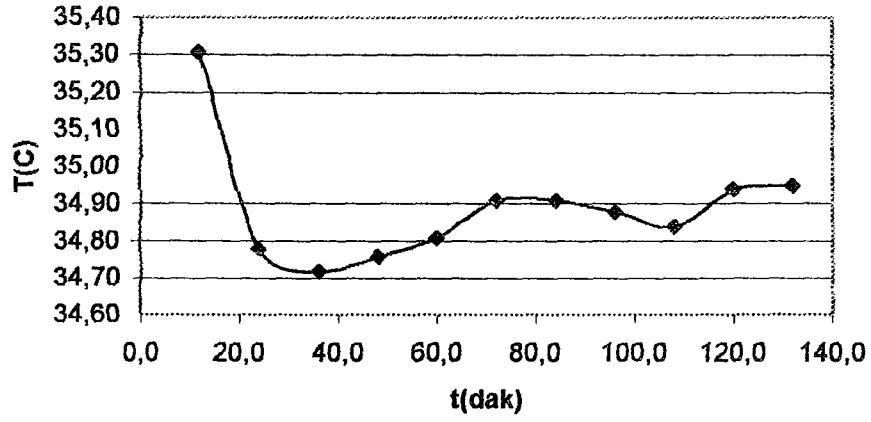
Saat	TC1	TC2	TC3	TC4	TC5	TC6	TC7	TC8	TC9
14:28	36,11	-	4,59	3,35	36,17	36,05	4,34	34,90	-
14:40	35,58	-	4,42	3,30	35,88	35,41	4,17	34,85	-
14:52	35,52	-	4,23	2,86	35,35	35,35	3,98	34,31	-
15:04	35,56	-	4,02	2,77	35,27	35,27	3,89	33,86	-
15:16	35,61	-	3,94	2,70	35,20	35,31	3,82	34,39	-
15:28	35,71	-	3,93	2,68	34,83	35,42	3,68	34,86	-
15:40	35,71	-	3,81	2,68	35,07	35,30	3,56	35,11	-
15:52	35,68	-	3,64	2,52	34,80	35,15	3,40	35,44	-
16:04	35,64	-	3,61	2,36	34,77	35,12	3,36	35,28	-
16:16	35,74	-	3,46	2,21	34,74	35,10	3,21	35,50	-
16:28	35,75	-	3,35	2,10	35,11	35,11	3,10	35,39	-

Çizelge 4.20 Düzeltilmiş sıcaklık değerleri

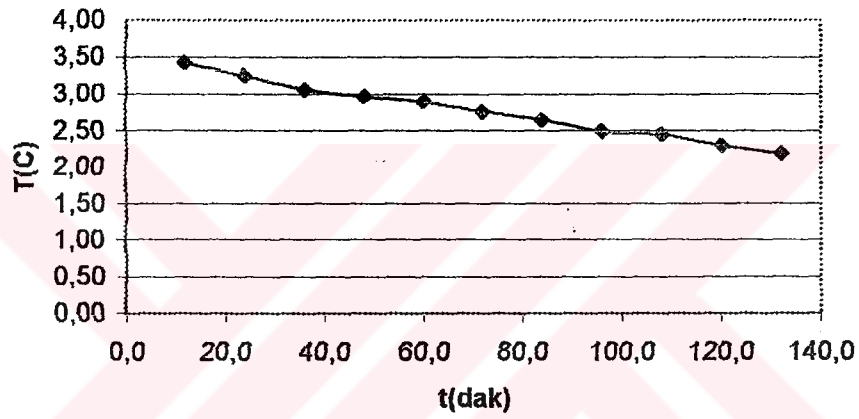
Saat	TC1	TC2	TC3	TC4	TC5	TC6	TC7	TC8	TC9
14:28	35,31	-	3,41	2,55	35,61	35,07	3,89	34,14	-
14:40	34,78	-	3,25	2,50	35,37	34,52	3,73	34,09	-
14:52	34,72	-	3,06	2,06	34,94	34,47	3,54	33,55	-
15:04	34,76	-	2,97	1,97	34,88	34,40	3,45	33,11	-
15:16	34,81	-	2,90	1,90	34,82	34,44	3,38	33,63	-
15:28	34,91	-	2,76	1,88	34,52	34,53	3,24	34,10	-
15:40	34,91	-	2,64	1,88	34,71	34,43	3,13	34,34	-
15:52	34,88	-	2,48	1,72	34,49	34,30	2,97	34,67	-
16:04	34,84	-	2,44	1,56	34,47	34,27	2,93	34,51	-
16:16	34,94	-	2,30	1,41	34,44	34,26	2,78	34,73	-
16:28	34,95	-	2,19	1,30	34,74	34,26	2,67	34,62	-

Çizelge 4.21 Isıl iletkenliğin hesabı

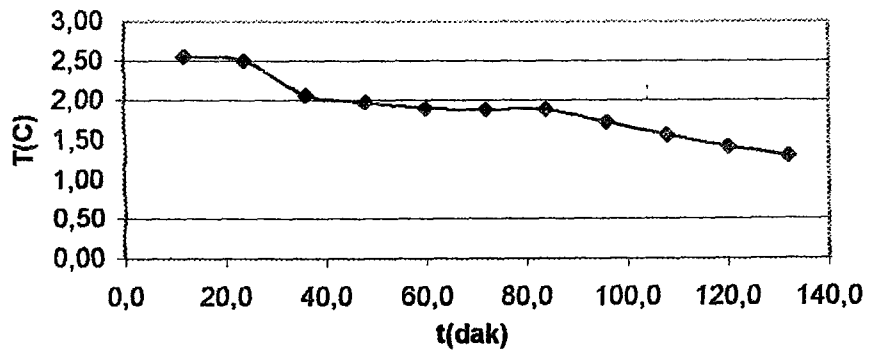
Saat	dT(2-9)	dT(3-6)	dT(5-7)	dTort	P(W)	A(m <sup>2</sup> )	L(m)	$\lambda$ (W/m.K)	K(W/m <sup>2</sup> .K)
14:28	-	31,66	31,72	31,69	5,19	0,16	0,0500	0,0512	0,98
14:40	-	31,28	31,65	31,46	5,19	0,16	0,0500	0,0516	0,97
14:52	-	31,41	31,40	31,41	5,19	0,16	0,0500	0,0517	0,97
15:04	-	31,43	31,42	31,43	5,19	0,16	0,0500	0,0516	0,97
15:16	-	31,54	31,44	31,49	5,19	0,16	0,0500	0,0516	0,97
15:28	-	31,77	31,27	31,52	5,19	0,16	0,0500	0,0515	0,97
15:40	-	31,79	31,59	31,69	5,19	0,16	0,0500	0,0512	0,98
15:52	-	31,82	31,52	31,67	5,19	0,16	0,0500	0,0513	0,98
16:04	-	31,83	31,54	31,68	5,19	0,16	0,0500	0,0512	0,98
16:16	-	31,96	31,66	31,81	5,19	0,16	0,0500	0,0510	0,98
16:28	-	32,08	32,07	32,07	5,19	0,16	0,0500	0,0506	0,99
							TOP	0,5646	10,72
							ORT	0,0513	0,97



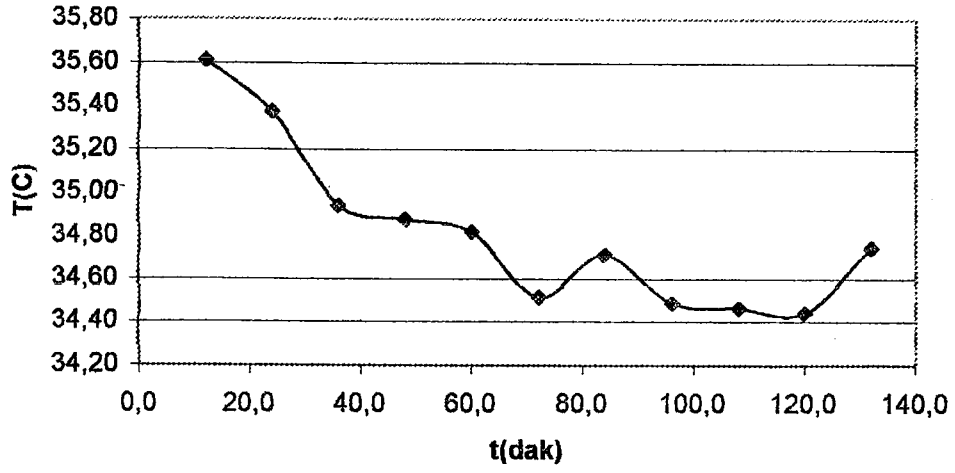
Şekil 4.67 Numune odası sıcaklığı-zaman grafiği



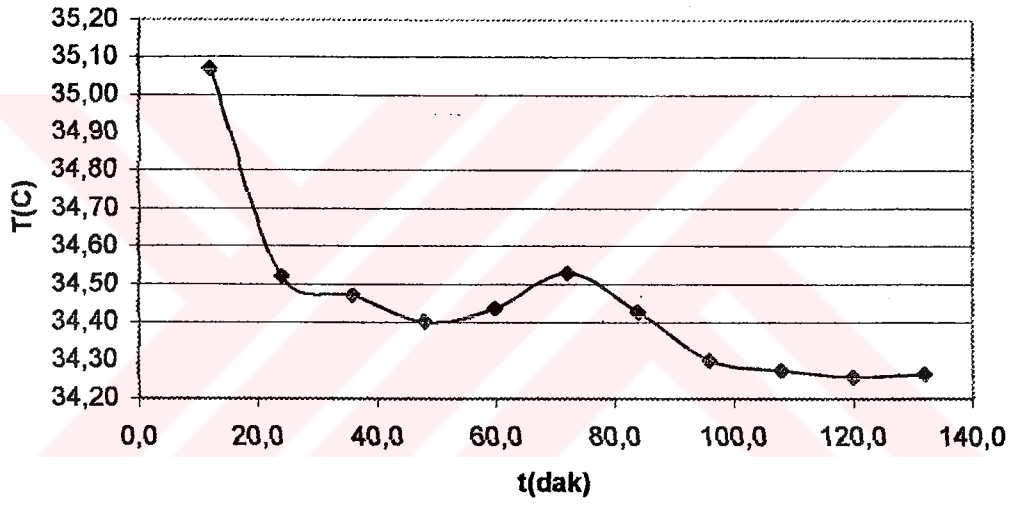
Şekil 4.68 Soğuk yüz 2 sıcaklığı-zaman grafiği



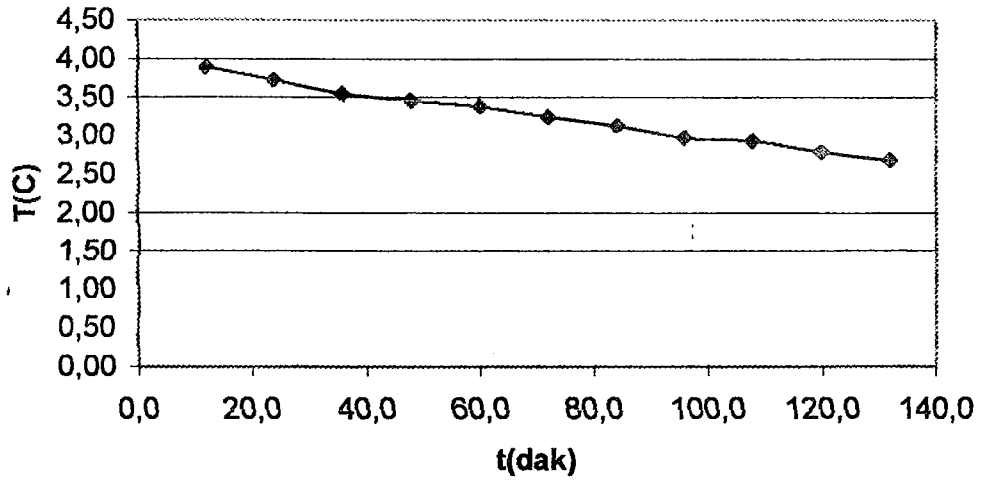
Şekil 4.69 Soğuk oda sıcaklığı-zaman grafiği



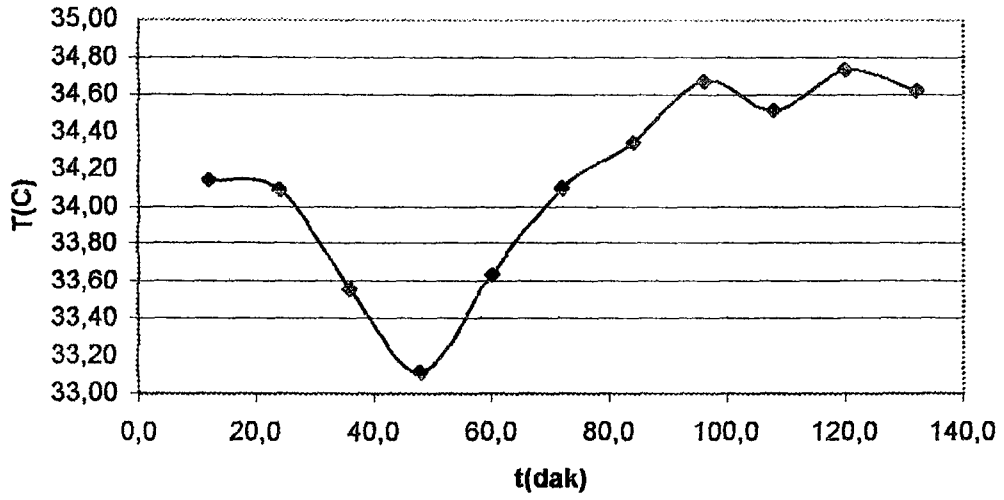
Şekil 4.70 Sıcakyüz1 sıcaklığı-zaman grafiği



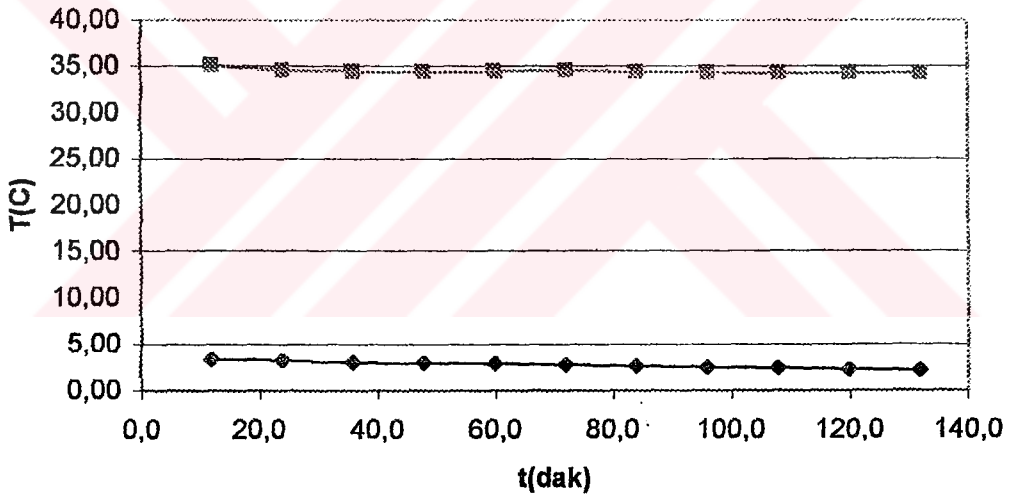
Şekil 4.71 Sıcakyüz2 sıcaklığı-zaman grafiği



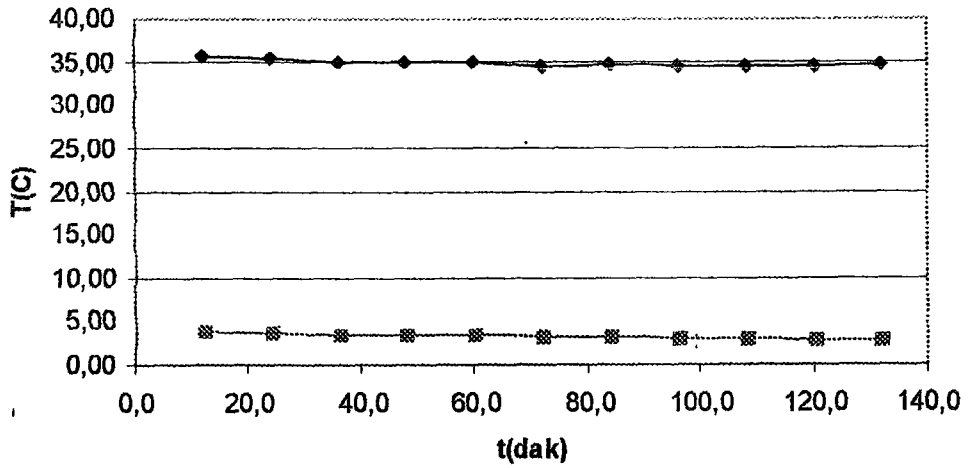
Şekil 4.72 Soğukyüz1 sıcaklığı-zaman grafiği



Şekil 4.73 Sıcak oda sıcaklığı-zaman grafiği



Şekil 4.74 Sıcakyüz2-soğukyüz2 sıcaklıklarının karşılaştırılması



## Şekil 4.75 Sıcakyüzl-Soğukyüzl sıcaklıklarının karşılaştırılması

## 4.6.3 E numunesinin ısı iletim katsayısının tayini

Çizelge 4.22 Termokupllardan alınan sıcaklık değerleri

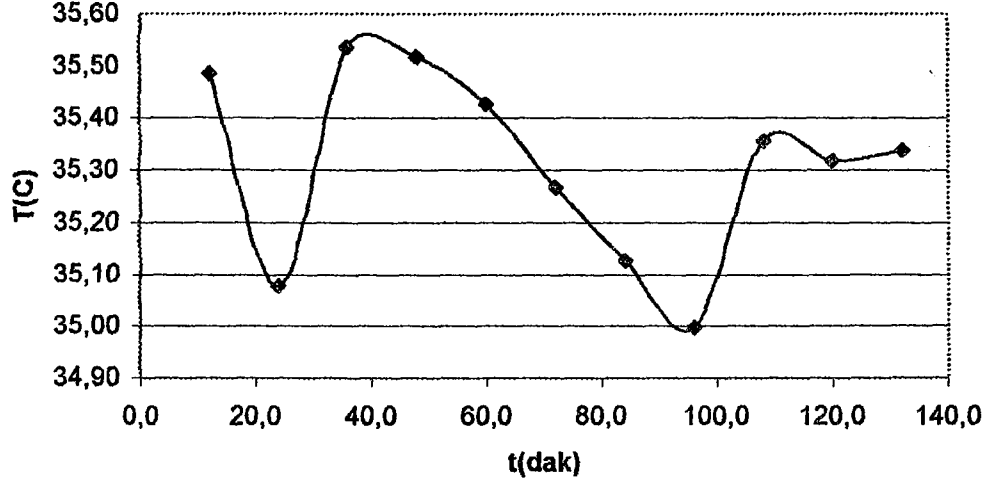
Saat	TC1	TC2	TC3	TC4	TC5	TC6	TC7	TC8	TC9
15:32	36,10	-	5,07	3,33	32,74	33,91	5,07	32,46	-
15:44	36,42	-	4,77	3,16	33,63	34,66	4,77	32,65	-
15:56	35,88	-	4,60	2,98	32,88	33,78	4,60	32,96	-
16:08	36,42	-	4,40	2,78	33,39	34,37	4,40	33,26	-
16:20	35,99	-	4,21	2,59	32,86	33,61	4,34	33,56	-
16:32	35,81	-	4,02	2,41	32,57	33,42	4,15	33,62	-
16:44	36,37	-	3,85	2,36	32,99	33,69	3,97	34,06	-
16:56	36,20	-	3,68	2,06	32,83	33,48	3,80	34,25	-
17:08	35,90	-	3,62	2,01	32,42	33,15	3,62	34,44	-
17:20	36,35	-	3,59	1,97	32,51	33,25	3,71	34,65	-
17:32	36,18	-	3,54	1,92	32,69	33,23	3,54	34,84	-

Çizelge 4.23 Düzeltilmiş sıcaklık değerleri

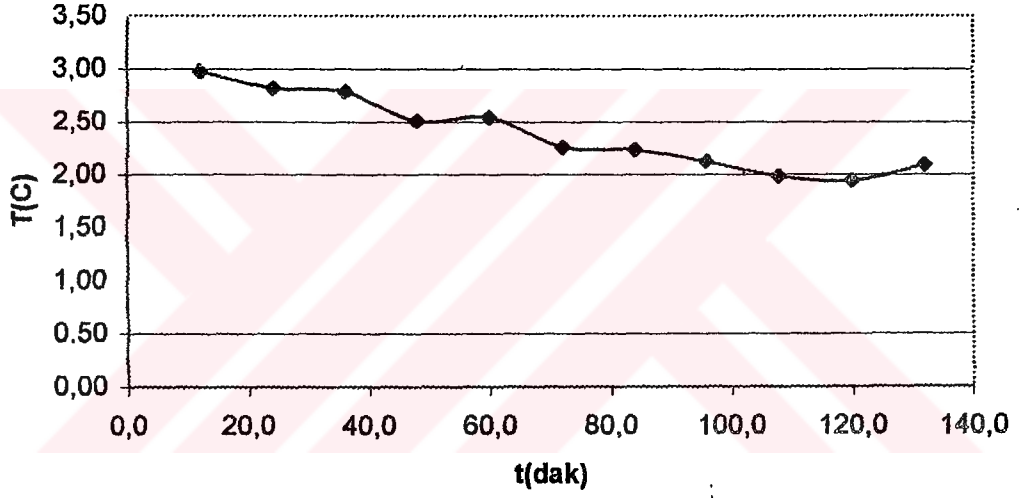
Saat	TC1	TC2	TC3	TC4	TC5	TC6	TC7	TC8	TC9
14:29	35,30	-	4,14	2,53	32,81	33,24	4,61	31,72	-
14:41	35,62	-	3,84	2,36	33,54	33,88	4,32	31,91	-
14:53	35,08	-	3,67	2,18	32,92	33,13	4,15	32,22	-
15:05	35,62	-	3,47	1,98	33,34	33,63	3,95	32,52	-
15:17	35,19	-	3,28	1,79	32,91	32,98	3,89	32,81	-
15:29	35,01	-	3,10	1,61	32,67	32,82	3,71	32,87	-
15:41	35,57	-	2,93	1,56	33,01	33,05	3,53	33,31	-
15:53	35,40	-	2,76	1,26	32,88	32,87	3,36	33,49	-
16:05	35,10	-	2,70	1,21	32,55	32,59	3,18	33,68	-
16:17	35,55	-	2,67	1,17	32,62	32,67	3,27	33,89	-
16:29	35,38	-	2,62	1,12	32,77	32,66	3,11	34,08	-

Çizelge 4.24 Isıl iletkenliğin hesabı

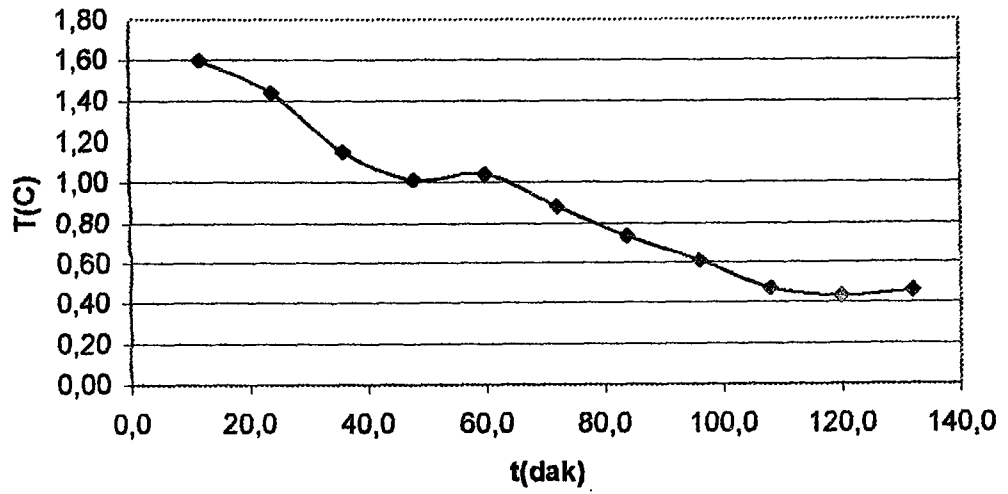
Saat	dT(2-9)	dT(3-6)	dT(5-7)	dTort	P(W)	A(m <sup>2</sup> )	L(m)	$\lambda$ (W/m.K)	K(W/m <sup>2</sup> .K)
14:29	-	29,10	28,20	28,65	7,97	0,16	0,0300	0,0522	0,58
14:41	-	30,04	29,22	29,63	7,97	0,16	0,0300	0,0504	0,59
14:53	-	29,46	28,77	29,12	7,97	0,16	0,0300	0,0513	0,58
15:05	-	30,16	29,39	29,77	7,97	0,16	0,0300	0,0502	0,60
15:17	-	29,70	29,01	29,36	7,97	0,16	0,0300	0,0509	0,59
15:29	-	29,72	28,96	29,34	7,97	0,16	0,0300	0,0509	0,59
15:41	-	30,12	29,48	29,80	7,97	0,16	0,0300	0,0502	0,60
15:53	-	30,11	29,52	29,82	7,97	0,16	0,0300	0,0501	0,60
16:05	-	29,89	29,36	29,63	7,97	0,16	0,0300	0,0505	0,59
16:17	-	30,00	29,35	29,68	7,97	0,16	0,0300	0,0504	0,60
16:29	-	30,04	29,66	29,85	7,97	0,16	0,0300	0,0501	0,60
							TOP	0,5572	6,52
							ORT	0,0507	0,59



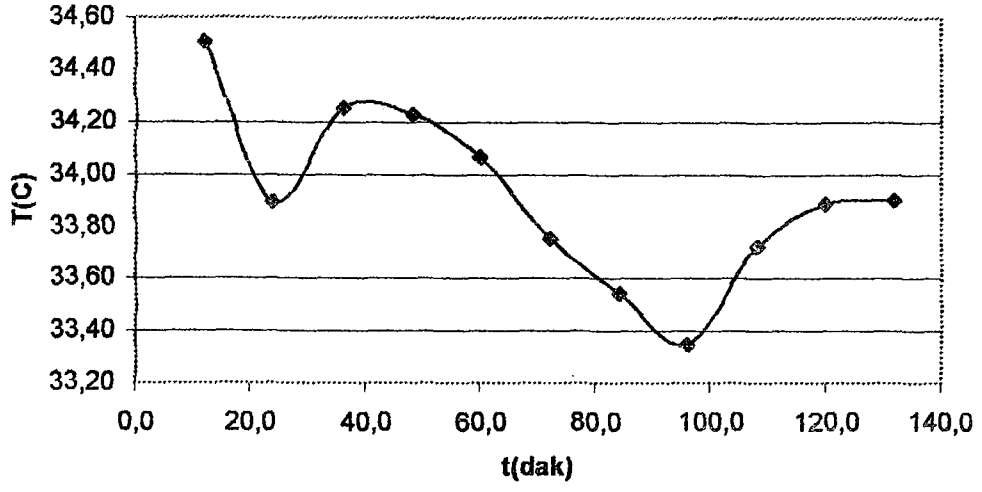
Şekil 4.76 Numune odası sıcaklığı-zaman grafiği



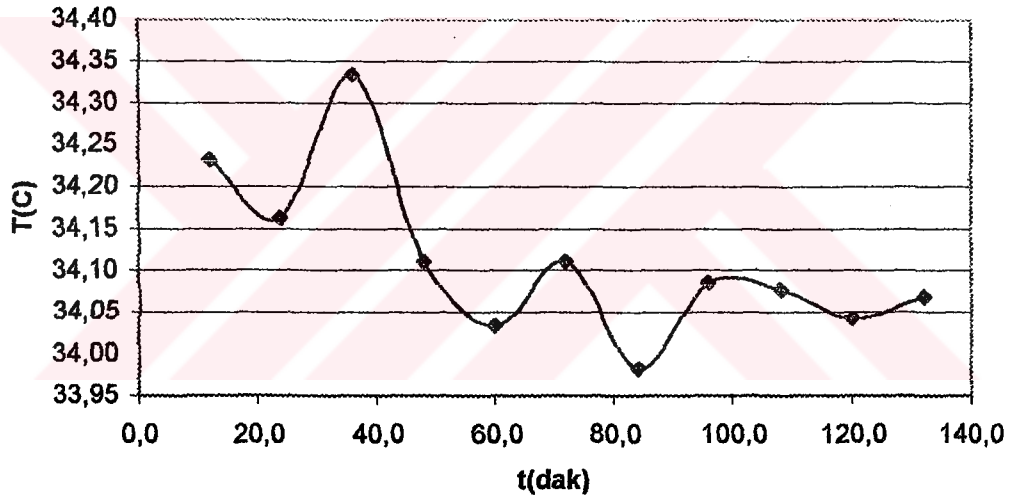
Şekil 4.77 Soğukyüz2 sıcaklığı-zaman grafiği



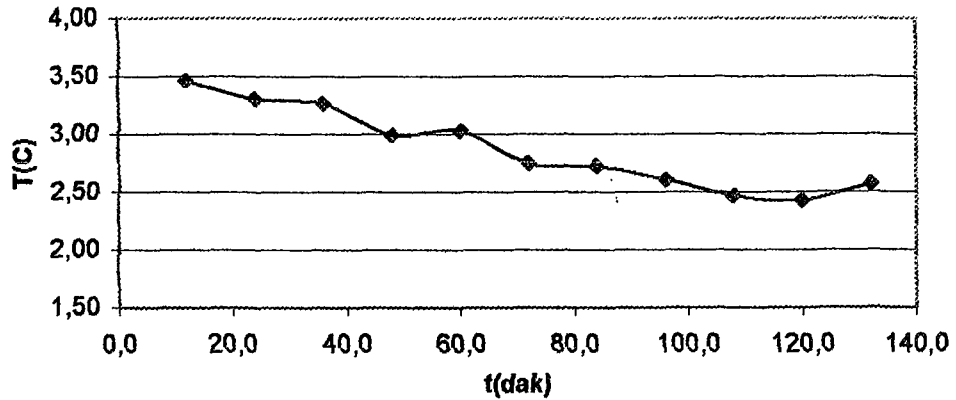
Şekil 4.78 Soğuk oda sıcaklığı-zaman grafiği



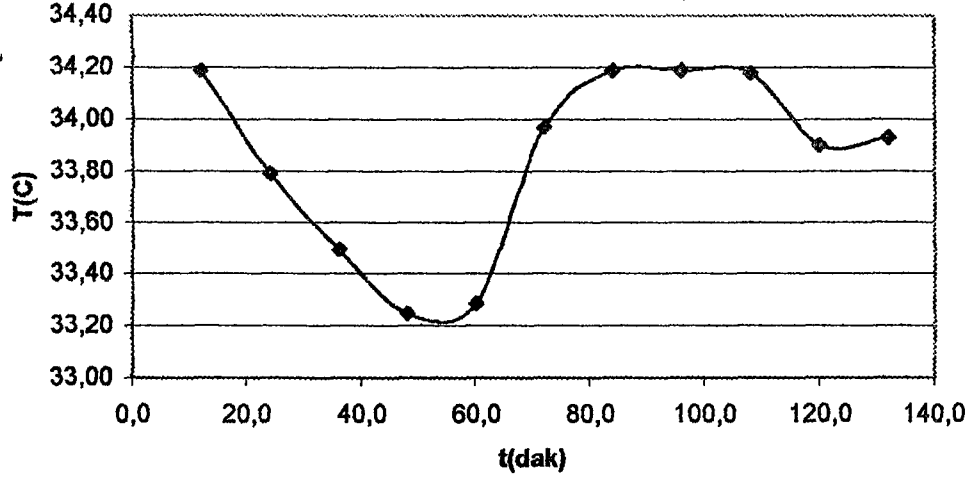
Şekil 4.79 Sıcakyüz1 sıcaklığı-zaman grafiği



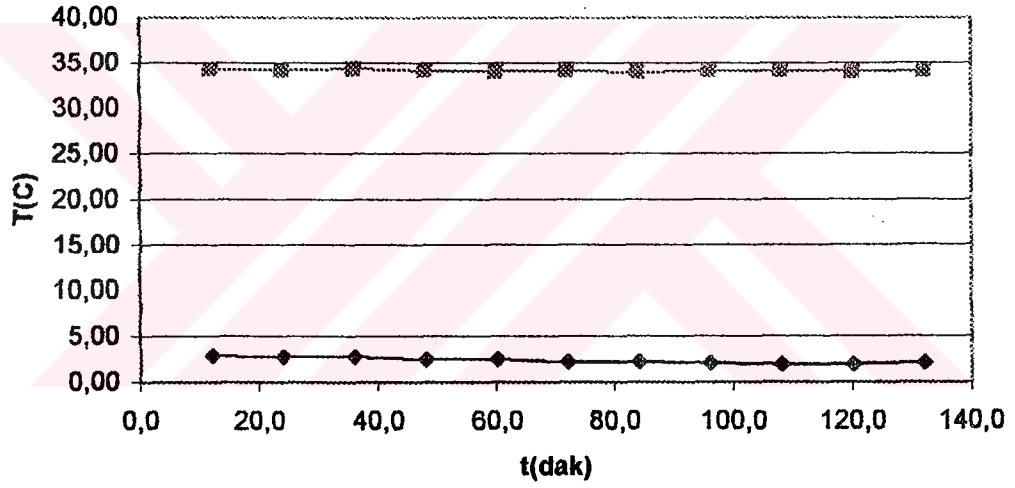
Şekil 4.80 Sıcakyüz2 sıcaklığı-zaman grafiği



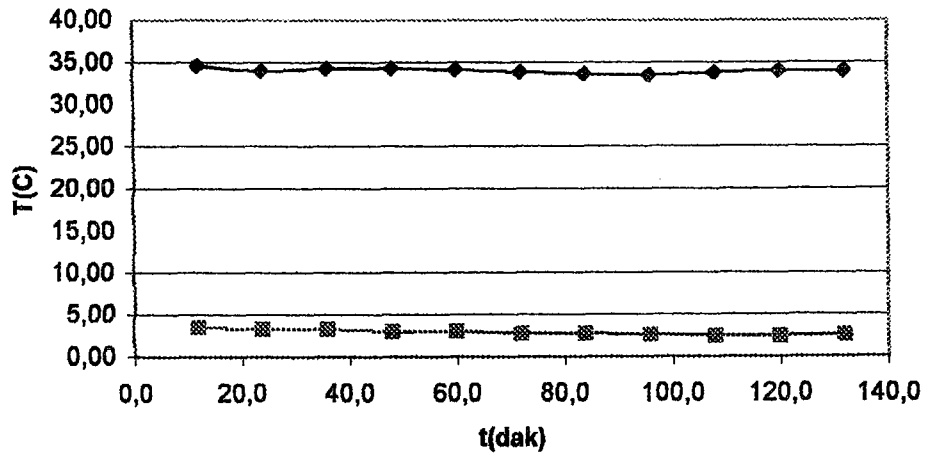
Şekil 4.81 Soğukyüz1 sıcaklığı-zaman grafiği



Şekil 4.82 Sıcak oda sıcaklığı-zaman grafiği



Şekil 4.83 Sıcakyüz2-soğukyüz2 sıcaklıklarının karşılaştırılması



Şekil 4.84 Sıcakyüz1-soğukyüz1 sıcaklıklarının karşılaştırılması

## 4.6.4 F numunesinin ısı iletim katsayısının tayini

Çizelge 4.25 Termokupullardan alınan sıcaklık değerleri

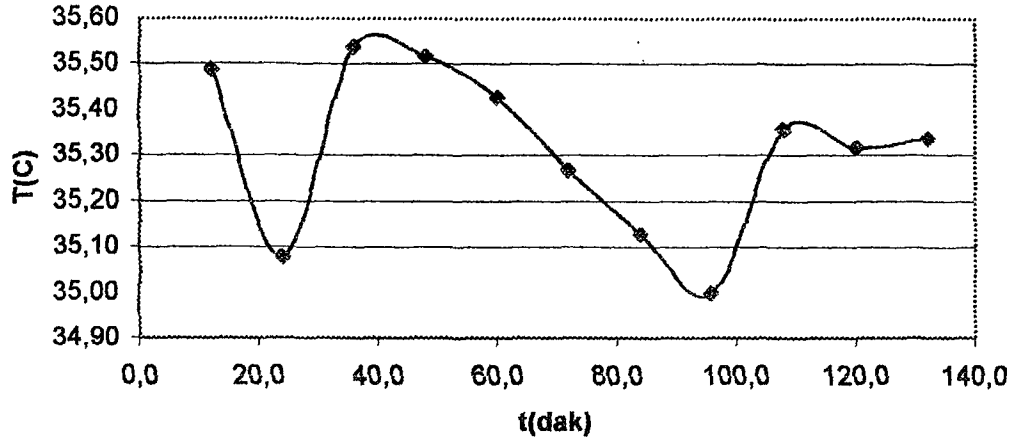
	TC1	TC2	TC3	TC4	TC5	TC6	TC7	TC8	TC9
14:29	36,29	-	4,15	2,40	34,82	35,07	3,90	34,95	-
14:41	35,88	-	3,98	2,24	34,07	34,99	3,74	34,55	-
14:53	36,34	-	3,82	1,95	34,51	35,19	3,70	34,25	-
15:05	36,32	-	3,55	1,81	34,48	34,93	3,42	34,00	-
15:17	36,23	-	3,59	1,84	34,28	34,84	3,46	34,04	-
15:29	36,07	-	3,42	1,68	33,90	34,93	3,17	34,73	-
15:41	35,93	-	3,27	1,53	33,64	34,78	3,15	34,95	-
15:53	35,80	-	3,01	1,41	33,40	34,90	3,03	34,95	-
16:05	36,16	-	3,10	1,27	33,86	34,89	2,89	34,94	-
16:17	36,12	-	3,00	1,23	34,06	34,85	2,85	34,66	-
16:29	36,14	-	2,80	1,26	34,08	34,88	3,00	34,69	-

Çizelge 4.26 Düzeltilmiş sıcaklık değerleri

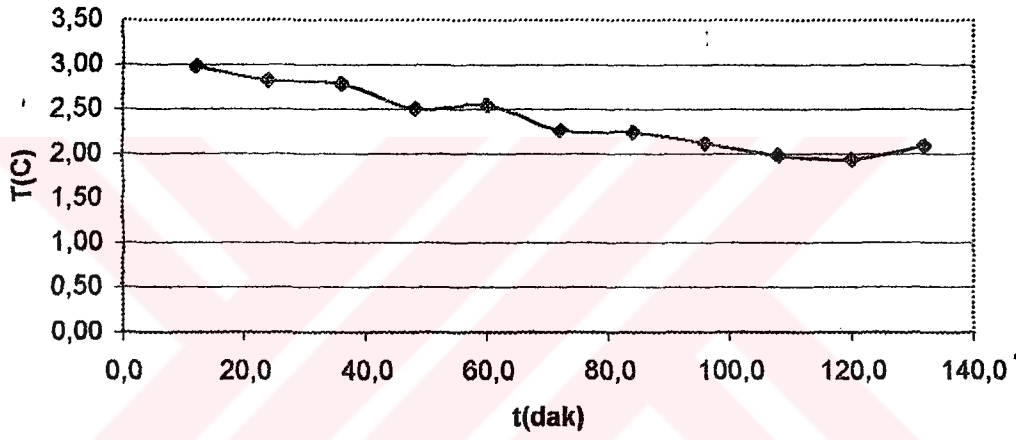
Saat	TC1	TC2	TC3	TC4	TC5	TC6	TC7	TC8	TC9
14:29	35,49	-	2,98	1,60	34,51	34,23	3,46	34,19	-
14:41	35,08	-	2,82	1,44	33,89	34,16	3,30	33,79	-
14:53	35,54	-	2,78	1,15	34,25	34,33	3,26	33,49	-
15:05	35,52	-	2,50	1,01	34,23	34,11	2,99	33,25	-
15:17	35,43	-	2,54	1,04	34,07	34,03	3,03	33,29	-
15:29	35,27	-	2,26	0,88	33,76	34,11	2,74	33,97	-
15:41	35,13	-	2,24	0,73	33,54	33,98	2,72	34,19	-
15:53	35,00	-	2,12	0,61	33,35	34,09	2,60	34,19	-
16:05	35,36	-	1,98	0,47	33,72	34,08	2,47	34,18	-
16:17	35,32	-	1,94	0,43	33,89	34,04	2,43	33,90	-
16:29	35,34	-	2,09	0,46	33,90	34,07	2,57	33,93	-

Çizelge 4.27 Isıl iletkenliğin hesabı

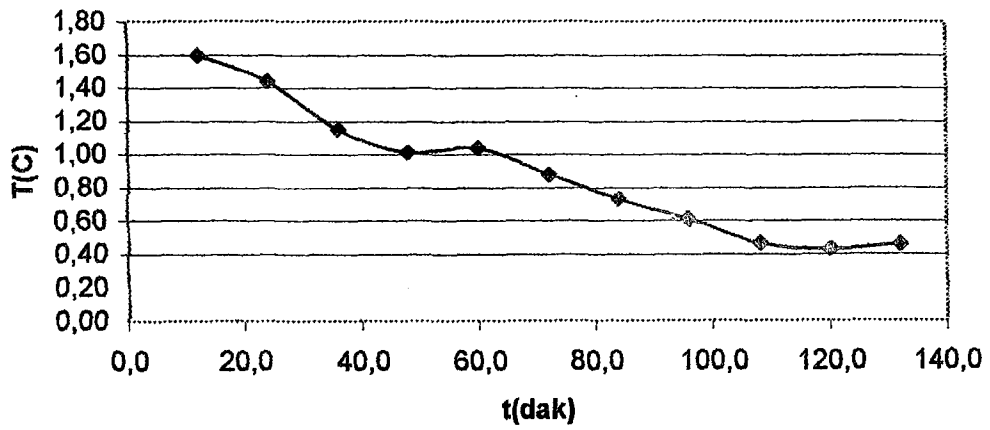
Saat	dT(2-9)	dT(3-6)	dT(5-7)	dTort	P(W)	A(m <sup>2</sup> )	L(m)	$\lambda$ (W/m.K)	K(W/m <sup>2</sup> .K)
14:29	0,00	31,25	31,05	31,15	6,53	0,16	0,0300	0,0393	0,76
14:41	0,00	31,34	30,59	30,97	6,53	0,16	0,0300	0,0395	0,76
14:53	0,00	31,55	30,99	31,27	6,53	0,16	0,0300	0,0391	0,77
15:05	0,00	31,61	31,24	31,42	6,53	0,16	0,0300	0,0389	0,77
15:17	0,00	31,49	31,04	31,27	6,53	0,16	0,0300	0,0391	0,77
15:29	0,00	31,85	31,01	31,43	6,53	0,16	0,0300	0,0389	0,77
15:41	0,00	31,75	30,82	31,28	6,53	0,16	0,0300	0,0391	0,77
15:53	0,00	31,97	30,74	31,36	6,53	0,16	0,0300	0,0390	0,77
16:05	0,00	32,10	31,26	31,68	6,53	0,16	0,0300	0,0386	0,78
16:17	0,00	32,10	31,46	31,78	6,53	0,16	0,0300	0,0385	0,78
16:29	0,00	31,98	31,33	31,65	6,53	0,16	0,0300	0,0387	0,78
							TOP	0,4290	8,46
							ORT	0,0390	0,77



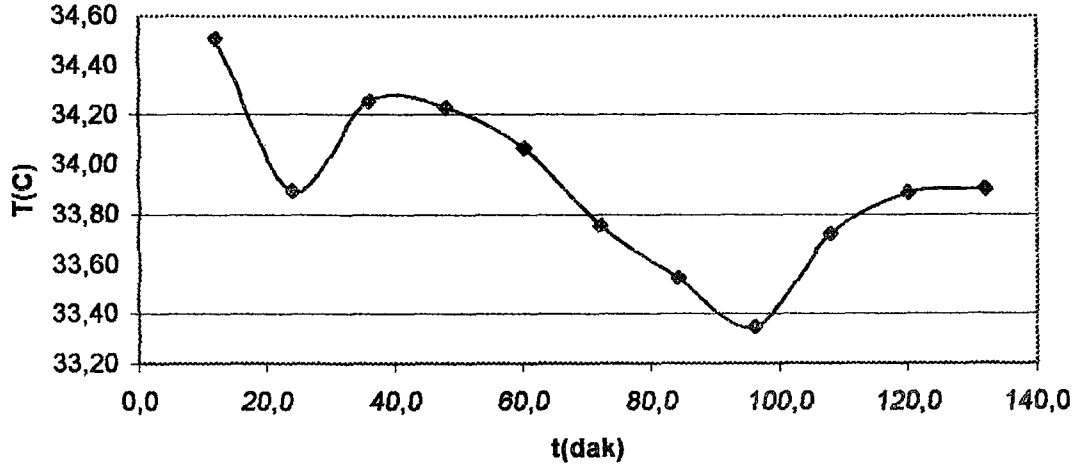
Şekil 4.85 Numune odası sıcaklığı-zaman grafiği



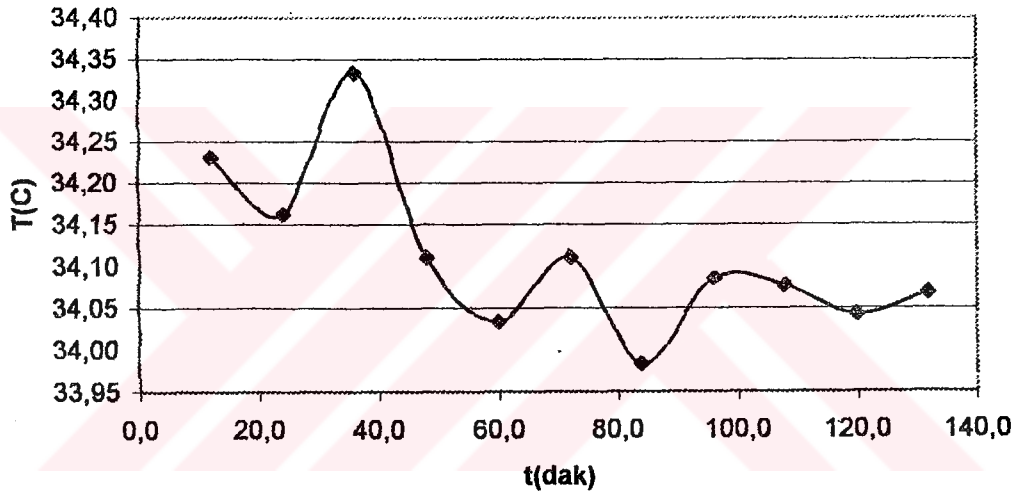
Şekil 4.86 Soğukyüz2 sıcaklığı-zaman grafiği



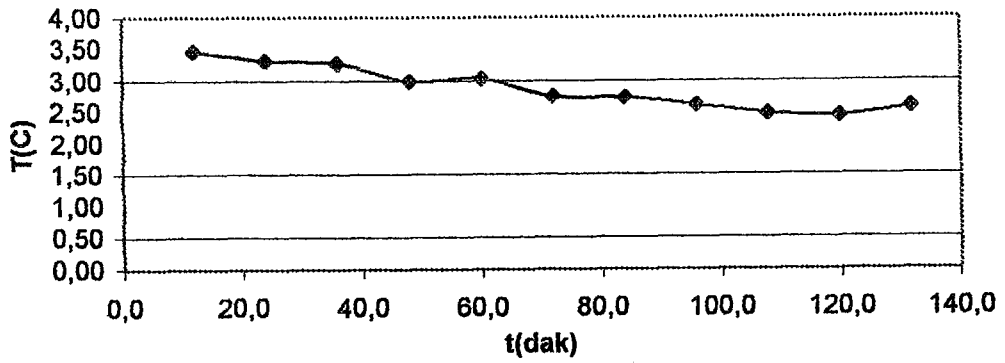
Şekil 4.87 Soğuk oda sıcaklığı-zaman grafiği



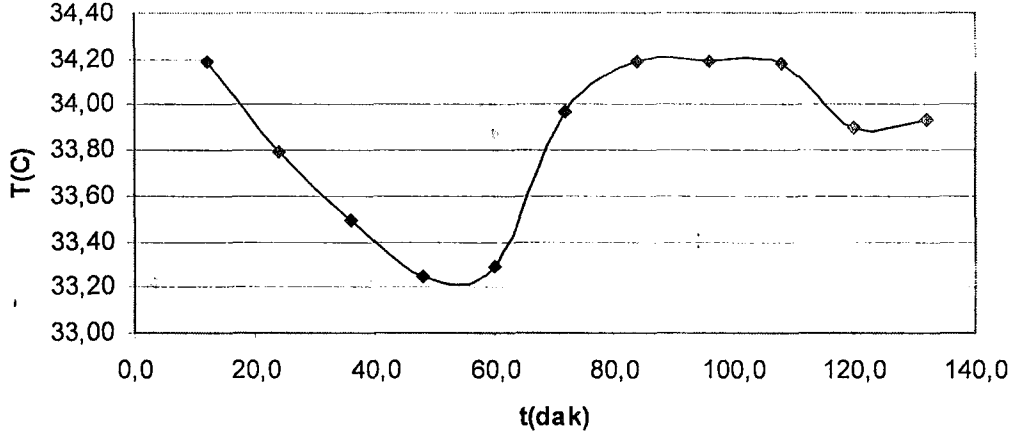
Şekil 4.88 Sıcakyüz1 sıcaklığı-zaman grafiği



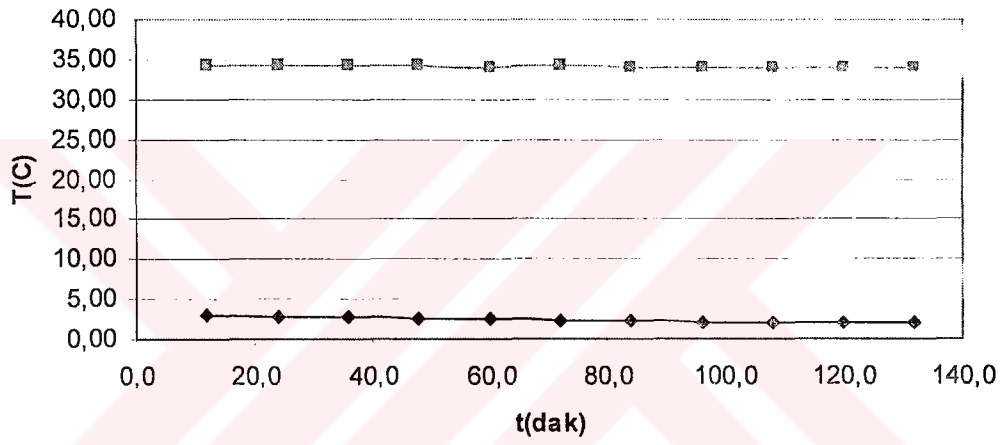
Şekil 4.89 Sıcakyüz2 sıcaklığı-zaman grafiği



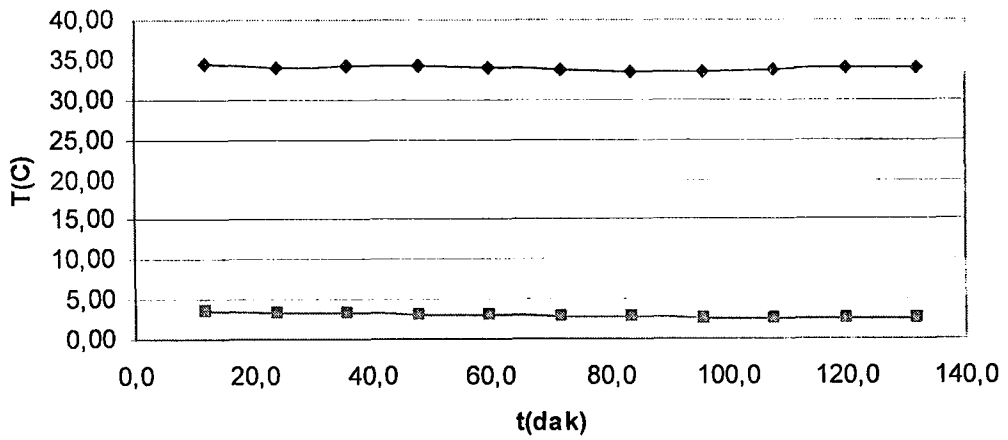
Şekil 4.90 Soğukyüz1 sıcaklığı-zaman grafiği



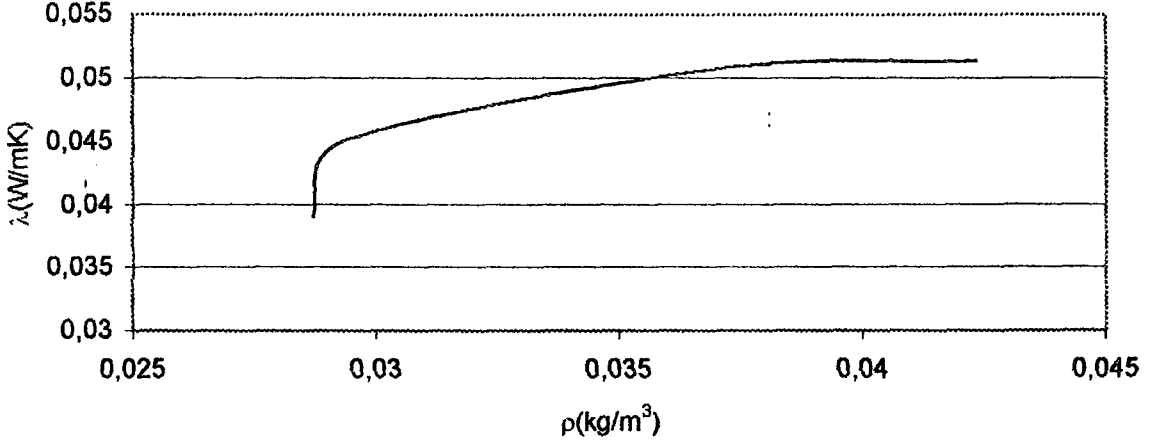
Şekil 4.91 Sıcak oda sıcaklığı-zaman grafiği



Şekil 4.92 Sıcakyüz2-soğukyüz2 sıcaklıklarının karşılaştırılması

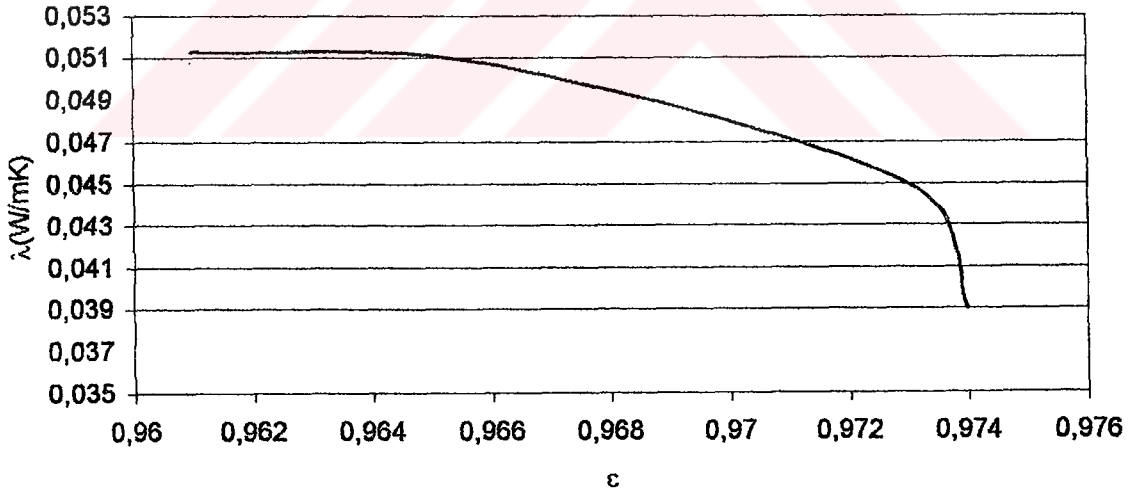


Şekil 4.93 Sıcakyüz1-soğukyüz1 sıcaklıklarının karşılaştırılması



Şekil 4.94 Yoğunluk-ısı iletkenlik

Malzemenin katı kısmının yüzdesi (kompozite), arttıkça yoğunluk artmakta, gözeneklilik ise azalmaktadır. Dolayısıyla yoğunluğun artışı ile ısı iletkenlik artmaktadır. Ama bunda etkili olan olay aslında direkt olarak yoğunluğun artışı değil, gözenekliliğin azalmasıdır. Yoğunluk artışı ısı iletkenliği dolaylı olarak azaltıcı yönde etkileyen bir faktördür.



Şekil 4.95 Gözeneklilik –ısı iletkenlik

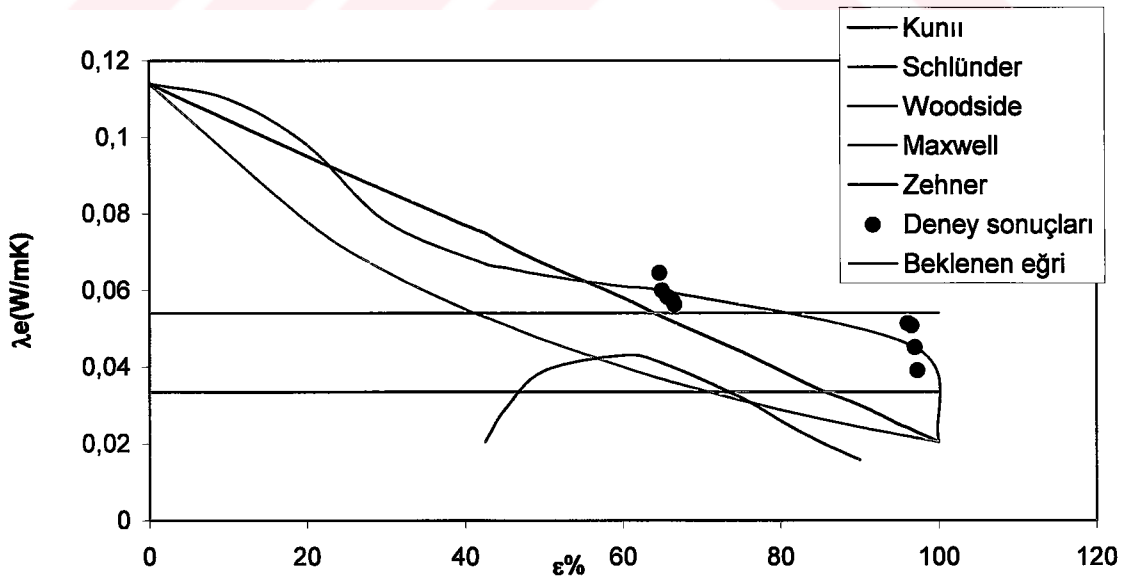
Gözenekliliğin artması ile ısı iletim katsayısı önemli ölçüde azalmıştır.

## 5. DENEY SONUÇLARININ DAHA ÖNCE YAPILMIŞ MATEMATİKSEL MODELLERLE KARŞILAŞTIRILMASI

Deneylerle elde edilen sonuçlar aşağıdaki matematik modeller kullanarak değerlendirildi. Bu değerlendirmeyi yapmak için matematik modellerin grafikleri, deney numuneleri polistren ve havadan oluşan bir karma malzeme olarak kabul edilerek ve geçerli olan  $\lambda_s$  (katı kısmın ısı iletkenliği) ve  $\lambda_f$  (akışkan kısmın ısı iletkenliği) değerleri modellerin denklemlerinde birer sabit olarak uygulanarak çizildi. Deney sonuçları aşağıdaki matematik modeller ile kıyaslandı. Bu modeller küresel tanecikler için yapılmışlardır ve Maxwell modeli hariç diğerleri küresel taneciklerin birbirine tamamen temaslı oldukları durum için önerilmiştir. Bu şartlar gözenekli levha numunelerimize uymaktadır. Maxwell modeli ise küresel taneciklerin birbirinden tamamen ayrı oldukları ve özellikle boşluklarla aralarının iyice açıldığı durumlar için önerilmiştir. Bu durum da sert polistren köpük numunelerimizde görülmektedir.

İncelenen matematik modeller şunlardır:

1. Maxwell (1904)
2. Schlünder (1958)
3. Kunii ve Smith (1960)
4. Woodside ve Messmer (1961)
5. Zehner ve Schlünder (1970)



Şekil 5.1 Deney sonuçları ve matematik modeller

1. Maxwell modeli daha önce de ifade edildiği gibi küresel taneciklerin birbirinden tamamen ayrı oldukları ve özellikle boşluklarla aralarının iyice açıldığı durumlar için önerilmiştir. Bu

durum da sert polistren köpük numunelerde görülmektedir. Sert polistren köpük numunelerle yapılan deneyler sonucunda elde edilen etkin ısı iletkenlik değerleri bu modelle hesaplanandan biraz daha yüksektir. Ancak çok büyük bir fark yoktur. Dolayısıyla Maxwell modelinin küresel taneciklerin boşluklarla iyice ayrıldığı durumda sağlıklı sonuçlar verdiği deney sonuçlarıyla yeniden kanıtlanmıştır.

2. Schlünder modelinin gözeneklilik ile etkin ısı iletkenlik ile bir ilişki kurmadığı grafikten açıkça anlaşılmaktadır. Diğer modellerle kıyaslandığında bu modelle elde edilecek sonuçların orta gözeneklilik değerlerinde (%50-%60 gibi) daha doğru sonuç verdiğini söylenebilir. Bunu söylerken gözenekli levha modelden elde edilen 5 deneyin sonucunu göz önüne alınmaktadır. Ayrıca sert polistren köpük numunelerden elde edilen 4 deney sonucunun Schlünder modeli kullanılarak elde edilen değerlere yakın oluşu bu modelin yüksek gözeneklilik yüzdeleri için doğru sonuçlar vermediğini kanıtlamaktadır.

3. Kunii ve Smith modeli geniş bir gözeneklilik aralığında sonuç veren bir modeldir. Bu bakımdan oldukça kullanışlıdır. Ancak grafikte görülen sonucun doğrusal oluşu bu modelin yeterince doğru sonuçlar vermediğini göstermektedir. Bu matematik modelde bulunan  $\Phi$  parametresi ki bu parametre temas eden 2 katı parçacığın arasında kalan akışkan film kalınlığının bir ölçüsü olarak tanımlanmıştır, oldukça zor belirlenebilmektedir. Şekil 5.1'de bu parametre sıfır alarak grafik çizilmiştir. Bu çalışmadan elde edilen deneylerin sonuçlarına göre etkin ısı iletkenlik ile gözeneklilik arasında doğrusal bir ilişki olmadığı anlaşılmaktadır.

4. Woodside ve Messmer modeli yine gözeneklilik ile etkin ısı iletkenlik ile bir ilişki kurmayan bir matematik modeldir. Bu model bu sebeple Schlünder modeli ile mukayese edilmelidir. Yine gözenekli levha modelinden elde edilen 5 deneyin sonucunu dikkate alarak bu modelin Schlünder modeline göre daha az güvenilir olduğunu söylenebilir. Ayrıca sert polistren köpük numunelerden elde edilen deney sonuçları bunu desteklemektedir. Her ne kadar grafikte bu 4 deney sonucunun Woodside ve Messmer modelini doğrulayan sonuçlar verdiği görülüyor gibiyse de sert polistren köpük numunelerin oldukça yüksek bir gözenekliliğe sahip oluşu küresel taneciklerin birbirine temasının mümkün olmadığını göstermektedir ve bu durumda bu numunelerden elde edilen deney sonuçlarının Woodside ve Messmer modelini desteklediği sonucu dikkate alınmamalıdır. çözümlerden uzak sonuçlar

5. Zehner ve Schülünder modeli en son bulunan modeldir. Ama yeterince kullanışlı bir model değildir. Çünkü gözenekliliğin yaklaşık %60 değerinde oluşan tepe noktasından sonra etkin ısı iletkenliğinin düşmesi gözeneklilik düştükçe ısı iletkenliğinin artışı temel ilkesine ters düşmektedir.

6. Deneylerin sonucunda yüksek gözeneklilik oranlarında gözeneklilik azaldıkça ısı iletkenliğin aniden arttığı görülmektedir. Bu beklenen bir sonuçtur çünkü gözenekliliğin %100 olduğu bir ortamı düşünürsek ki tamamen boşluktan oluşmaktadır ısı iletkenliği bu çalışmada havanın ısı iletkenliği olan 0,0204 W/mK olacaktır. İşte böyle bir ortam gözeneklilik azaldıkça polistren kristallerle bölünecek ve yeni ısı köprülerinin de etkili olduğu bir ısı iletkenlik değeri oluşmaya başlayacaktır. Polistren kristallerin ısı iletkenlik değeri havanınkinden büyük olduğundan etkin ısı iletkenlik aniden yükselecektir. Ama hala yapıda kristaller temas etmemiş durumdadır. Gözeneklilik azalmaya devam ettikçe polistren kristaller temas etmeye başlayacaklardır ve bu süreçte ısı iletkenliğin ani artışı azalarak doğrusala yakın bir değişim izlemeye başlayacaktır. Gözeneklilik azalmaya devam ettikçe polistren kristallerin oluşturduğu ısı köprüleri etkili olmaya başlayacak ve etkin ısı iletkenliğin artışı hızlanacaktır. Daha sonra yeni ısı köprülerin oluşması artık etkin ısı iletkenliği daha az artırır duruma gelerek nihayetinde gözenekliliğin %0 olduğu noktada polistren kristalin 0,114 W/mK olan değerine ulaşacaktır. Deney sonuçlarından beklenen bu eğri şekil 5.1'de gösterilmiştir. Bu çalışmada, düşük gözeneklilik değerleri için, beklenen bu eğriyi destekleyecek nitelikte ölçümler yapılmamıştır; numuneler orta ve yüksek gözeneklilik değerlerine sahiptir. Daha sonraki çalışmalarda düşük gözeneklilik değerlerine sahip numuneler için etkin ısı iletkenlik değerlerinin ölçülmesi, çalışma yapacak araştırmacılara tarafımızdan önerilmektedir.

## 6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Gözeneklilik malzemelerin fiziksel özelliklerini etkileyen önemli bir faktördür ve malzemenin mikro yapısı ile doğrudan ilişkilidir. Bu bağlamda gözeneklilik ile ilgili yapılacak çalışmalar por yapısının iyi kavranmasını ve gözenekliliğin ölçülmesini içeren deneysel kısımlar içermelidir. Bu amaçla ışık mikroskobu , elektron mikroskobu gibi cihazlardan ve gözeneklilik ölçüm tekniklerinden faydalanılması önerilir.

Isıl iletkenliğin ölçümü başta yalıtım sektörü olmak üzere ısı tekniği üzerine çalışan büyük bir sektörün gereksinimidir. Dolayısıyla bu konu üzerinde yapılacak çalışmalar sanayi açısından da faydalıdır.

Gözenekli ortamda ısıl iletkenliği ölçmek için öncelikle taşınım ve ışınım ile ihmal edilebilecek düzeyde ısı transferi gerçekleştiren numunelere ihtiyaç vardır.

Doğal malzemelerde gözeneklilik ancak ölçülerek belirlenebilir. Ancak laboratuvar şartlarında oluşturulan suni malzemelerle hesapla belirlenebilir gözeneklilik elde edilebilir. Nitekim gözenekli ortamda yapılan bir çok çalışma paket yatak olarak adlandırılan bu tür fiziksel modellerde kütle ve ısı transferi konusunda yapılmıştır.

Gözenekli ortamda ısıl iletkenlik katsayısı ile ilgili olarak yapılan çalışmalar 2. Bölümde sunulmuş, 5. Bölümde ise deney sonuçları ile kıyaslanmıştır. Sonuç olarak bu çalışmaların hala eksikliklerinin olduğu görülmüştür. Ancak yapılan deney sayısının az olması nedeniyle yeni bir eğri ya da matematik model oluşturulamamıştır. Buna rağmen deney sonuçları ve bu deney sonuçlarından beklenen bir eğri Bölüm 5' de sunulmuştur.

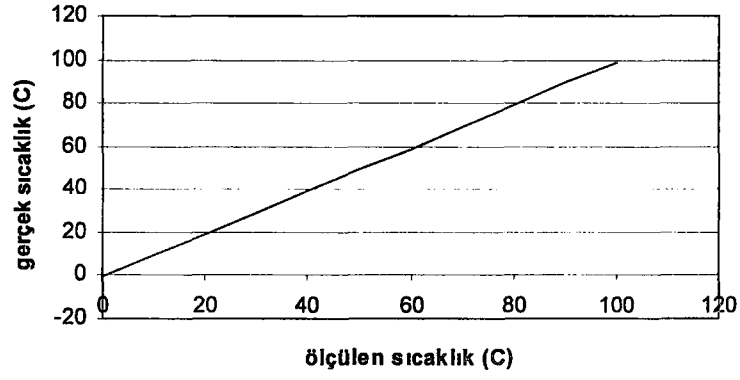
**KAYNAKLAR**

- Kaviany, M., (1995), "Principles of Heat Transfer in Porous Media", Michigan, Second Edition
- Nield, D.A., Bejan, A. (1992), "Convection in Porous Media", New York.
- Scheidegger, A.E., (1974), "The Physics of Flow through Porous Media ", University of Toronto Press, Toronto
- Bejan, A. (1992), "Convection Heat Transfer", Wiley, New York
- Dullien, F.A.L., (1979), "Porous Media: Fluid Transport and Pore Structure", Academic, New York
- Kakaç, S., Kiliş, B., Kulakci, F.A., Arinç, F., (1991), "Convective Heat and Mass Transfer in Porous Media", Kluwer Academic Publishers, Netherlands
- Maxwell, C.J., (1904), "A Treatise on Electrical and Magnetism", Clarendon Pres, Oxford, England, Third Edition
- de Vries, D.A., (1952), "Mededelingen van de Landbouwhogeschool te Wageningen",
- Krischer, O. ve Kröll, K., (1956), "Die wissenschaftlichen Grundlagen der Trocknungstechnik", Berlin
- Yagi, S. And Kunii, D., (1957), "Studies on Effective Thermal Conductivity in Packed Bed ", A. I. Ch. E. Journal 3 373-381
- Kunii, D. ve Smith., J. M (1960), "Heat Transfer characteristic of Porous Rocks ", A. I. Ch. E. Journal 6 71-77
- Woodside, W. ve Messmer, J.H., (1961), "Thermal Conductivity of Porous Media", Journal of Applied Physics 32 1688-1706
- Deissler, R.G and Boegli, J.S (1958), "An investigation of Effective Thermal Conductivity of Powders in Various Gases", Journal of Heat Transfer 80 1417-1425
- Wakao, N. and Kato, K., (1969), "Effective Thermal Conductivity of Packed Beds", A. I. Ch. E. Journal 9 34-41
- Penner, E., Johnston, G.H., Goodrich , L.E., (1975), "Thermal Conductivity Laboratory Studies of some MacKenzie Highway Soils", Canadian Geotechnical Journal 12(3) 271-288
- Farouki, O.T. (1986), "Thermal Properties of Soils", New York: Trans Tech Publications
- Salomone, L.A, ve Kovacs, W.D (1984), "Thermal Resistivity of Soils", Journal of Geotechnical Engineering 110(3) 375-389
- Salomone, L.A, ve Marlowe, J.I (1989), "Soil Rock Classification according to Thermal Conductivity", Journal of Geotechnical Engineering 110(3) 375-389

**EKLER****Ek 1 Termokuplların Kalibrasyon Eğrileri**

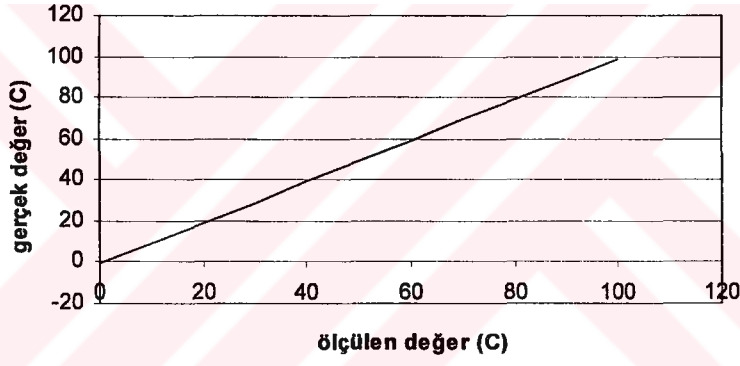
**Ek 1 Termokuplların Kalibrasyon Eğrileri**

TC1 kalibrasyon eğrisi



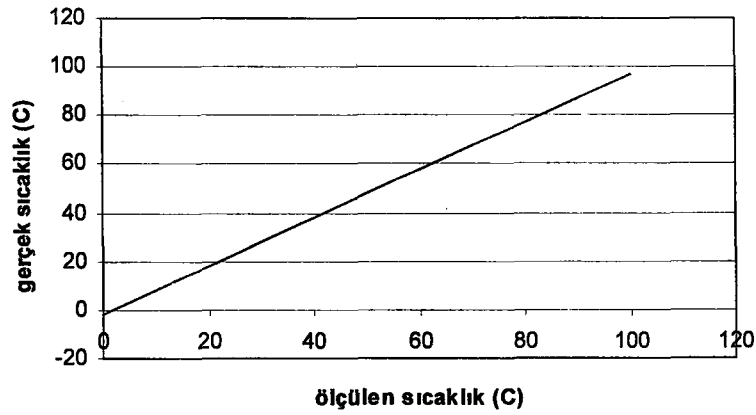
Şekil Ek 1.1 TC1 kalibrasyon eğrisi

TC2 kalibrasyon eğrisi



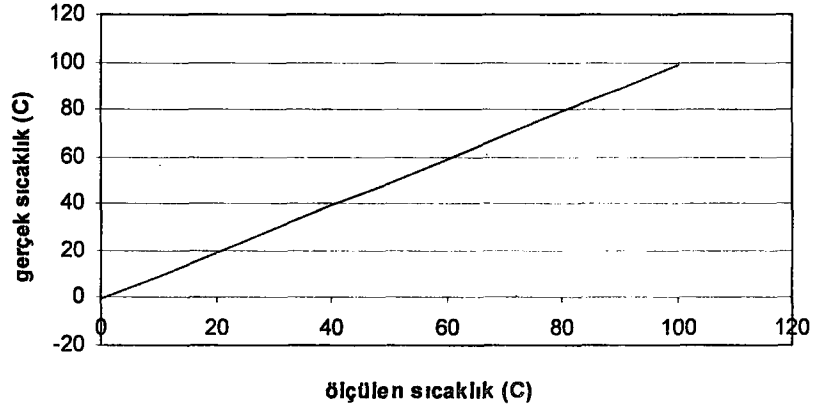
Şekil Ek 1.2 TC2 kalibrasyon eğrisi

TC3 kalibrasyon eğrisi



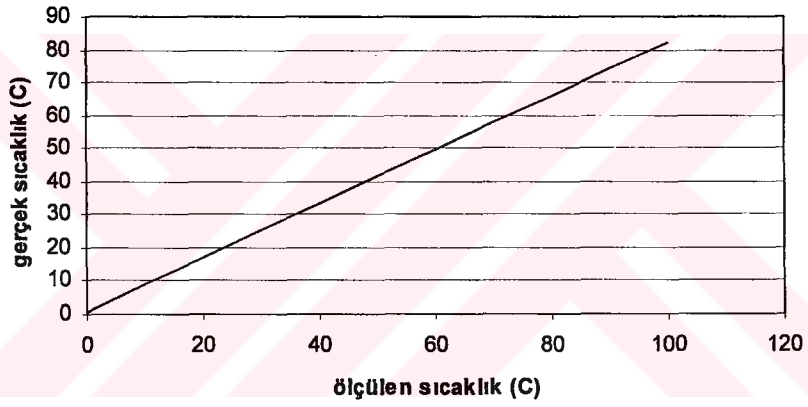
Şekil Ek 1.3 TC3 kalibrasyon eğrisi

TC4 kalibrasyon eğrisi



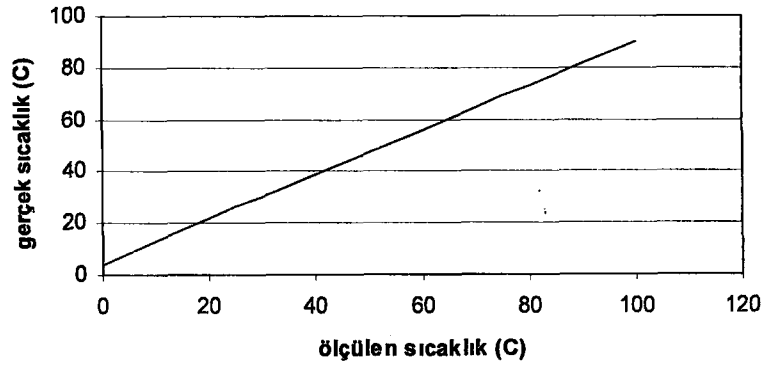
Şekil Ek 1.4 TC4 kalibrasyon eğrisi

TC5 kalibrasyon grafiği



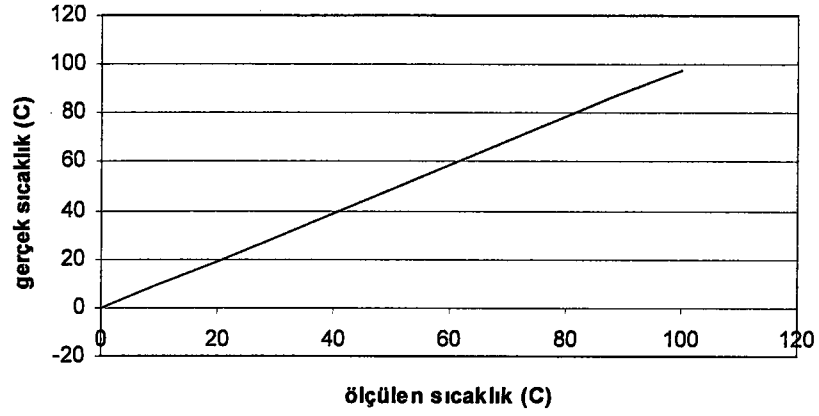
Şekil Ek 1.5 TC5 kalibrasyon eğrisi

TC6 kalibrasyon grafiği



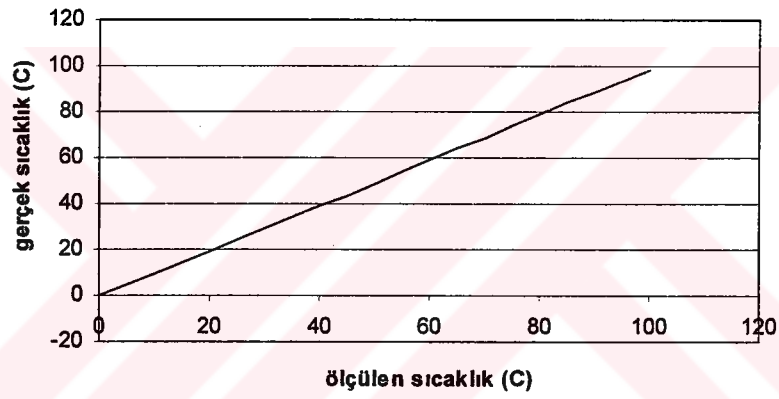
Şekil Ek 1.6 TC6 kalibrasyon eğrisi

TC7 kalibrasyon grafiği



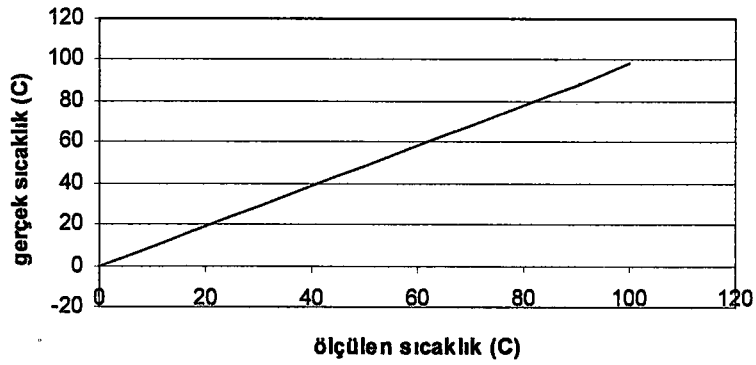
Şekil Ek 1.7 TC7 kalibrasyon eğrisi

TC8 kalibrasyon eğrisi



Şekil Ek 1.8 TC8 kalibrasyon eğrisi

TC9 kalibrasyon eğrisi



Şekil Ek 1.9 TC9 kalibrasyon eğrisi

**ÖZGEÇMİŞ**

Doğum tarihi 17.09.1978

Doğum yeri İstanbul

Lise 1993-1996 İstanbul Atatürk Fen Lisesi

Lisans 1996-2000 Yıldız Teknik Üniversitesi Makine Fak.  
Makine Mühendisliği Bölümü

Yüksek Lisans 2000-2003 Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü  
Makine Müh. Anabilim Dalı, Isı Proses Programı

**Çalıştığı kurum(lar)**

2002-Devam ediyor YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Araştırma Görevlisi

