

T.C  
SELÇUK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

KÖMÜR STOKLARINDAKİ  
KENDİLİĞİNDEN YANMA  
OLAYININ İNCELENMESİ- GARP  
LİNYİTLERİ İŞLETMESİ (GLİ)  
ÖRNEĞİ

Abdülhadi Erdal ÖZDENİZ  
DOKTORA TEZİ  
MADEN MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI  
Konya, 2003

T.C. YÖKSEKÖĞRETİM KURULU  
BİLİM VE TEKNOLOJİ BAKANLIĞI

T.C  
SELÇUK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

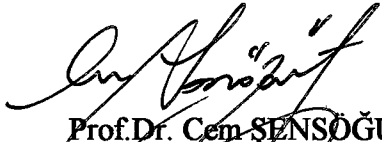
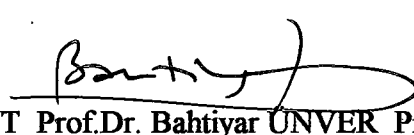

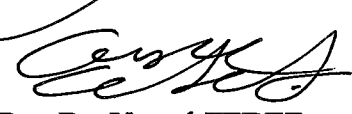
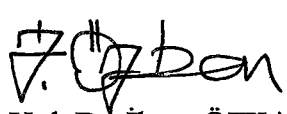
KÖMÜR STOKLARINDAKİ KENDİLİĞİNDEN YANMA OLAYININ  
İNCELENMESİ- GARP LİNYİTLERİ İŞLETMESİ (GLİ) ÖRNEĞİ

134260

Abdülhadi Erdal ÖZDENİZ

DOKTORA TEZİ  
134260  
MADEN MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Bu tez 18/09/2003 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği ile kabul edilmiştir.

  
Prof.Dr. Cem ŞENSOĞÜT (Danışman)  
  
Prof.Dr. Bahtiyar UNVER (Üye)  
  
Prof.Dr. M. Kemal GÖKAY (Üye)  
  
Doç.Dr. Veysel ZEDEF (Üye)  
  
Yrd .Dr. İhsan ÖZKAN (Üye)

## ÖZET

Doktora Tezi  
KÖMÜR STOKLARINDAKİ KENDİLİĞİNDEN YANMA OLAYININ  
İNCELENMESİ- GARP LİNYİTLERİ İŞLETMESİ (GLİ) ÖRNEĞİ

Abdülhadi Erdal ÖZDENİZ

Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

Maden Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr.Cem ŞENSÖĞÜT

2003, 185 Sayfa

Jüri : Prof. Dr. Cem ŞENSÖĞÜT

Prof. Dr. Bahtiyar ÜNVER

Prof. Dr. M. Kemal GÖKAY

Doç. Dr. Veysel ZEDEF

Yrd. Doç. Dr. İhsan ÖZKAN

Kömür, yeraltı ve yerüstünde çıkarıldığı şekliyle satılabildiği gibi, çoğunlukla bazı fiziksel özelliklerinin iyileştirilmesi için kömür hazırlama tesislerinde işlendikten sonra satılabilmektedir. Ancak tüm yıl üretildiği halde enerji üretim tesislerinin kullanımı dışında, ev ve işyeri ısıtma işlemi için genellikle kış aylarına girişte satılabilmektedir. Bu nedenle, çoğu zaman stoklanmak zorundadır. Ayrıca, enerji üretiminde sürekliliği sağlamak için, enerji üretim tesisleri de sürekli olarak stoklu çalışmaktadırlar. Bunların dışında dışalım yoluyla temin edilen kömürlerde, iç dağıtımdan önce büyük miktarlarda stoklanmaktadır. Uzun süreli olarak kömürün stoklanması sırasında, kömürün kalorisinde azalma ve kendiliğinden yanma olayları büyük sorunlar oluşturmaktadır.

Bu nedenle, Garp Linyitleri İşletmesi'nin kömür stok sahasında bulunan üretim fazlası kömürler üzerinde çalışmalar yapılmıştır. Stok sahasında 18-50 mm tane boyutunda, uzunluğu 10 m, eni 5 m ve yüksekliği 3 m olan değişik zamanlarda iki adet kömür yığını oluşturulmuştur. Hazırlanan bu stoğun içinde belirli noktalara, sıcaklık farklarını algılayabilecek 20 adet sıcaklık sensörü, 1 adet hava nemi ve 1 adet de hava sıcaklık sensörü yerleştirilmiştir. Bu şekilde oluşturulan kömür yığınındaki ölçümleri, periyodik olarak bilgisayar yardımıyla otomatik olarak alabilmek amacıyla bir sistem oluşturulmuştur. Arazide oluşturulan bu stoktan, ölçümler her 5 dakikada bir alınmıştır. Ayrıca, el ile saat başlarında atmosfer basıncı, rüzgar hızı ve yönü değerleri alınmıştır. Daha sonra arazi ölçümlerine çoklu regresyon analizleri uygulanmıştır. Kömür yığını üzerinde etkili olan parametrelerin hepsini yansıtabilecek şekilde istatistiksel model geliştirilmeye çalışılmıştır. Bu modelin  $R^2$  değerleri ortalama 0,85'lerde çıkmıştır. Deneysel çalışmaların teorik analizi için sonlu elemanlar metodu (SEM) kullanılmıştır. Deneysel çalışmaların bilgisayar ortamına tam olarak uyarlanabilmesi için ise gerçek yığının bütün özelliklerini ve ölçülerini yansıtabilecek şekilde bir model oluşturulmuştur. Bu modelden elde edilen sonuçlar, arazi ölçümleri ve istatistiksel analiz sonuçları ile karşılaştırıldığında uygunluk göstermiştir.

Yığın içinden sıcaklık ölçümü almak için oluşturulan 1. ve 2. yığında kalori değerleri 5124 ve 4758 kcal/kg iken, deney bittiğinde 4488 ve 4572 kcal/kg değerine düşmüştür. Ayrıca, stok tane boyut değerlerinde ortalama % 50 azalma olduğu tespit edilmiştir. Yapılan çalışmalara ilave olarak, İşletmenin kendi yaptığı stoklar üzerinde de sıcaklık ölçümleri yapılmış ve kalori değerinin 2646 kcal/kg olduğu görülmüştür.

Uzun süreli stoktaki kömürlerin beklemesi sonucunda oluşan boyut ve kalori düşüşleri, ciddi ekonomik kayıplar oluşturmaktadır.

Stok sahalarında oluşturulan kömür yığın yüksekliğinin ve eninin düşük tutulmasıyla kendiliğinden tutuşmanın büyük ölçüde önlenebileceği belirlenmiştir. Yığının sıcaklığını etkileyen parametrelerden hava sıcaklığı, hava nemi ve atmosfer basıncı gibi parametrelerin kendiliğinden yanmada önemli etkileri olduğu görülmüştür.

**Anahtar Kelimeler:** Kömür, kendiliğinden yanma, stok kömürlerde tutuşma, istatistiksel model, sonlu elemanlar metodu.





**ABSTRACT**

PhD Thesis

An Experimental Investigation of Spontaneous Combustion for the Coal Stockpiles-  
Western Lignite Corporation (WLC) Case.

Abdülhadi Erdal ÖZDENİZ

Selçuk University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Mining Engineering

Supervisor : Prof.Dr. Cem ŞENSÖĞÜT

2003, 185 Pages

Jury : Prof. Dr. Cem ŞENSÖĞÜT

Prof. Dr. Bahtiyar ÜNVER

Prof. Dr. M. Kemal GÖKAY

Assoc. Dr. Veysel ZEDEF

Assist. Prof. Dr. İhsan ÖZKAN

**ABSTRACT**

The coal can be marketed as produced from either underground or open pit, however it is mostly presented to the consumers' service after some of its physical properties are upgraded in the coal washeries. A part from the utilisation in power plants, it is usually sold just before the winter season for domestic usage. Therefore, it is generally kept in large stockyards for some period. Additionally, in order to keep the continuity in power production, power plants also work continuously having constant stocks of coal. Moreover, the export coal should also be kept in stocks in large amounts before it is distributed for domestic purposes. During long waiting periods, coal undergoes selfheating and losses its majority of calorific value.

Therefore, in this work, an experimental search was carried out on the spontaneous combustion for the stockpiles formed by the excess of produced coal at Western Lignite Corporation (WLC). For this purpose, a stockpile having an average particle size of 18-50 mm with the dimensions of 10 m in length, 5 m in width and 3 m in height was established in the storage yard. A total of 20 heat sensors were located inside the pile together with a humidity sensor and a sensor to detect the weather temperature. Therefore, a system to take the necessary measurements in and out of the stockpile periodically was assembled. During this experimental work, the values in concern were taken once every five minutes. In addition, values for atmospheric pressure, velocity and direction of wind were also manually taken every hour. Hereafter, the multiple regression analysis was applied to the measurements taken from stockyard. A statistical model was additionally developed for the parameters affecting the stockpile. The  $R^2$  values of the model were around 85% in average. Theoretical analysis of the experimental works was performed by the utilization of Finite Elements Method (FEM). In order to exercise the experimental works on the computer, another model reflecting overall features of the pile was besides created. The results obtained from this model complied with the in-situ measurements and the statistical analysis results in a comparison.

The temperature measurements taken from first and second stockpiles were 5124 and 4758 kcal/kg in the beginning while they were measured as 4488 and 4572 kcal/kg at the end of the work. Additionally, the average size of the coal lumps was almost decreased twice during this experimental work. However, the same measurements taken from the original stocks created by the colliery itself and it were found that the calorific value of the coal was around 2646 kcal/kg. Therefore, the long lasting coal stocks result in serious economical losses.

It was observed that the spontaneous combustion in the stockpiles of coal can be prevented by decreasing the height and the width of the pile. It was also observed that the weather temperature and humidity together with the atmospheric pressure affecting the heat of pile were effective parameters in the selfheating of the coal stockpiles.

**Key Words:** Coal, spontaneous combustion, selfheating in the stockpiles, statistical model, finite elements method.



## TEŞEKKÜR

Tez çalışmalarım süresince her türlü yardımını esirgemeyen danışmanım, Sayın Prof. Dr. Cem ŞENSÖĞÜT'e öncelikle şükranlarımı sunar, teşekkür ederim. Çalışmalarım esnasında bana yol gösteren Prof. Dr. Bahtiyar ÜNVER ve Yrd. Doç. Dr. İhsan ÖZKAN'a ayrıca teşekkür eder, saygılar sunarım. Çalışmamda araştırma projelerine katkısı büyük olan Rektörüm Prof.Dr. Abdurrahman KUTLU'ya ve en büyük maddi desteği sağlayan BAP'a teşekkürlerimi bir borç bilirim. Ayrıca bilgi ve desteklerini gördüğüm Arş. Grv. Nihat YILMAZ, Dr. Adnan BERBER, Yrd. Doç. Dr. Bülent GÜNDOĞDU ve Yrd. Doç. Dr. Osman BİLGİN'e teşekkür ederim.

Maddi destekleriyle katkıda bulunan H.İbrahim AYDIN, Eşref ÇİFTÇİ, Vedat YÖNDEM, İsmail ULUSAN, Bilal ÇITIR ve Gürol ÖZPINAR'a da teşekkür ederim.

GLİ Tunçbilek Kömür İşletmesinde yapmış olduğum ölçüm ve çalışmalarda benden yardımlarını esirgemeyen İşletme Eski Müdürü Kemal PEMBE, İşletme Müdürü Paşa KAYA, Makine İşletme Şube Müdürü Enver ŞEKERCİ, Elektrik Başmühendisi Süleyman BAŞKAYA, Maden Mühendisleri Mehmet TAKSUK ve Emir BARUT, Misafirhane Müdürü Sinan SERT, işçiler Metin SAKA ve Yavuz ÇOTUK'a teşekkür ederim.

Bu günlere gelmemi borçlu olduğum değerli annem Azime ÖZDENİZ, beni devamlı teşvik eden eşim Serpil ÖZDENİZ ve manevi katkılarını hissettiğim oğlum Mustafa ve kızım Beyzanur ÖZDENİZ'e teşekkür ederim.



**Babam Erdal ve Ağabeyim Mustafa ÖZDENİZ'in anılarına...**

**İÇİNDEKİLER**

ÖZET	i
ABSTRACT	iii
TEŞEKKÜR	iv
İÇİNDEKİLER	vi
ÇİZELGELER DİZİNİ	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	x
1. GİRİŞ	1
2. KÖMÜRÜN KENDİLİĞİNDEN YANMASI	4
2.1. Tanımlar ve Genel Bilgiler	4
2.2. Kömürün Kendiliğinden Yanması	5
2.3. Kendiliğinden Yanma Olayına Etki Eden Faktörler	8
2.3.1. İç faktörler	8
2.3.1.1. Kömürleşme derecesi	8
2.3.1.2. Petrografik bileşenler	9
2.3.1.3. Nem içeriği	10
2.3.1.4. Kömürün tane boyutu	11
2.3.1.5. Mineral madde içeriği	12
2.3.1.6. Pirit içeriği	12
2.3.2. Dış faktörler	13
2.3.2.1. Atmosferik koşullar	13
2.3.2.2. Kömür yığın gözenekliliği	14
2.3.2.3. Jeolojik yapı	15
2.3.2.4. Maden işletme yöntemi	16

## İÇİNDEKİLER(devam)

2.3.2.5. Havalandırma koşulları	17
3. KENDİLİĞİNDEN YANMA OLAYININ İNCELENMESİNİ ARAŞTIRAN YÖNTEMLER	19
3.1. Laboratuar Ölçekli Çalışmalar	19
3.1.1. İzotermal kalorimetri yöntemi	20
3.1.2. Adyabatik oksidasyon yöntemi	21
3.1.3. Tutuşma sıcaklığı yöntemi	22
3.1.4. Diferansiyel termik analiz (DTA) yöntemi	24
3.1.5. Termo gravimetrik analiz (TGA) yöntemi	25
3.1.6. Olpinski yöntemi	26
3.2. Büyük Ölçekli veya Gerçek Boyutlarda Yapılan çalışmalar	27
3.3. Teorik Çalışmalar	28
3.4. Stok Kömürler Üzerinde Yapılan Çalışmalar	29
4. GLİ'DEKİ KÖMÜR STOKLARINDA KENDİLİĞİNDEN YANMA OLAYININ İNCELENMESİ	37
4.1. Garp Linyitleri İşletmesi (GLİ)	38
4.1.1. İşletme Müdürlüğü'nün yeri, kuruluş amacı ve tarihçesi	38
4.1.2. Tunçbilek havzasının jeolojisi	38
4.1.2.1. Konum	39
4.1.2.2. Stratigrafi	39
4.1.2.3. Yapısal jeoloji	41
4.2. Tunçbilek Bölgesi Kömür Üretim Sistemleri	41
4.2.1. Açıkocak üretimi	41
4.2.2. Yeraltı üretimi	43
4.3. Deney Sistemi ve Deneyin Yapılışı	44

**İÇİNDEKİLER(devam)**

4.3. Deney Sistemi ve Deneyin Yapılışı	44
4.4. Bilgisayarlı Ölçüm Sistemi	50
4.4.1. Dönüştürücü devreleri	51
4.4.2. Analog-Dijital dönüştürme ünitesi	53
4.4.3. Bilgisayar programı	54
4.5. Deneysel Çalışmada Kullanılan Aletler	59
4.6. Araziden Alınan Verilerin İncelenmesi	62
4.7. Kendiliğinden Tutuşmuş Stoklardan Alınan Ölçümler	68
<b>5. ARAZİ ÖLÇÜM SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ</b>	<b>71</b>
5.1. İstatistik Analizler	71
5.2. Sonlu Elemanlar Yöntemi ve Isı Transferine Uygulanışı	76
5.2.1. Programın kullanılması	77
5.3. Kömür Yığınınındaki Sıcaklık Dağılımının Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Bulunması	78
5.3.1. Katı modelleme ve ağ üretimi	78
5.3.2. Sonlu elemanlar çözümü	81
5.4. Arazi Ölçümleri ile Diğer Modellerin Karşılaştırılması	84
5.5. Kömür Yığınının Sıcaklık Haritasının Çıkarılması	90
<b>6. SONUÇLAR ve ÖNERİLER</b>	<b>96</b>
6.1. Sonuçlar	96
6.2. Öneriler	101
<b>KAYNAKLAR DİZİNİ</b>	<b>102</b>
<b>EKLER</b>	<b>111</b>

## ÇİZELGELER DİZİNİ

No	Sayfa
2.1. Çeşitli kömür türlerinin özellikleri	4
2.2. Kömürün oksijen adsorpsiyonuna sıcaklığın etkisi	6
2.3. Oksidasyon sonucu yangınların oluşması	7
2.4. Kömürün kendiliğinden yanmasını etkileyen faktörler	8
3.1. Olpinski risk indeksi	27
4.1. Dekapaj ve kömür üretim miktarları	42
4.2. Yeraltı kömür üretim miktarları	43
4.3. Deneysel çalışma için hazırlanan yığından çeşitli tarihlerde alınan numunelere ait kısa kömür analiz sonuçları	49
4.4. Deneysel çalışma için hazırlanan yığından çeşitli tarihlerde alınan numunelere ait tane boyut analiz sonuçları	50
4.5. Pt100'in (K tip) teknik özellikleri	59
4.6. Pt100'ün direnç değerleri	60
4.7. Thermohyrometer Model 8711'e ait teknik özellikler	61
4.8. Dijital Anemometer Model 8903 'in teknik özellikleri	61
4.9. Beş dakikalık aralıklarla yığında ölçülen tipik ham değerler	63
4.10. Beş dakikalık aralıklarla yığından ölçülen ham verilerin filtrelendikten sonra aldıkları tipik değerler	65
4.11. Bir saat aralıklarla ölçülmüş ve filtrelenmiş değerler	67
4.12. GLİ-Tunçbilek stok sahasında yanan bir stoğun kısa kömür analizi	68
5.1. Modelden elde edilen T1'e ait katsayılar	73
5.2. Hava, kömür ve çakıllı toprağın özellikleri	81
5.3. DOS 20 °C için sıcaklıkların karşılaştırılması	87
5.4. DOS 25 °C için sıcaklıkların karşılaştırılması	87
5.5. DOS 30 °C için sıcaklıkların karşılaştırılması	88
5.6. DOS 35 °C için sıcaklıkların karşılaştırılması	88
5.7. Sensörlerin koordinat sistemindeki yeri, a) Zeminden 1 m yükseklik, b) Zeminden 2 m yükseklik	91



## ŞEKİLLER DİZİNİ

No	Sayfa
3.1. Zaman-sıcaklık eğrisi	21
3.2. Tipik bir zaman - sıcaklık eğrisi	23
3.3. Tipik bir DTA termogramı	25
3.4. TGA eğrisi Tunçbilek kömürlerine bağlı elde edilen tipik bir TGA eğrisi	26
4.1. Garp Linyitleri İşletmesi yer bulduru haritası	39
4.2. Havzaya ait stamp	40
4.3. Oluşturulan yığının batı tarafından genel görünüşü	44
4.4. Oluşturulan yığının güney tarafından görünüşü	45
4.5. Oluşturulan yığının yakından görünüşü	45
4.6. Oluşturulan yığının doğu yönünden görünüşü	46
4.7. Oluşturulan yığına sensörler yerleştirilirken	46
4.8. Yığına yerleştirmek üzere hazırlanmış olan sondalar	47
4.9. Yığındaki Pt100'lerin şematik gösterimi, a) Plan, b) AA' kesit	48
4.10. Seri direnç devresi	52
4.11. İkinci dereceden alçak geçiren filtre devresi	52
4.12. Diferansiyel amplifikatör	53
4.13. Ölçüm değerlerini gösteren birinci arayüz	56
4.14. Ölçüm değerlerinin kaydedildiği yeri gösteren ikinci arayüz	57
4.15. Sistemin kalibrasyonunun yapıldığı üçüncü arayüz	58
4.16. Pt100'ün Gerilim-Sıcaklık grafiği	59
4.17. Pt100'ün Direnç-Sıcaklık grafiği	60
4.18. Beş dakikalık aralıklarla ölçülen T1'e ait tipik zaman-sıcaklık eğrisi	62
4.19. Beş dakikalık aralıklarla ölçülen T1'e ait tipik filtrelenmiş zaman-sıcaklık eğrisi	64
4.20. Bir saat aralıklarla ölçülmüş ve filtrelenmiş T1'e ait 100 saatlik zaman-sıcaklık grafiği	66
4.21. Stoğun boy kesitini gösteren şematik gösterim	69
4.22. Kendiliğinden tutuşan stokta zaman-sıcaklık eğrileri	69

## ŞEKİLLER DİZİNİ(devam)

4.23.	GLİ-Tunçbilek İşletme sahasında kendiliğinden yanan stokta ölçülen CO değerlerini gösteren grafik	70
5.1.	T1'e ait arazi ölçümleri ve istatistiksel modelden hesaplanan yığın içi sıcaklık değerleri	74
5.2.	T1'e ait arazi ölçümleri ve istatistiksel modelden hesaplanan değerlerin ilk 300 saate göre grafikleri	75
5.3.	Ansys program için kömür yığınının katı modellenmesi ve ağ üretimi	79
5.4.	Modelin eleman sayılarını gösteren kesit	80
5.5.	Modelin düğümlü durumunu gösteren kesit	80
5.6.	Dış ortam sıcaklığının sabit olması durumunda modelde oluşan sıcaklık profilleri	82
5.7.	Ansys paket program yardımıyla modelde belirlenen 9 ayrı bölgedeki sıcaklıklara ait, a) Sıcaklık dağılımı, b) Sıcaklık akısı	83
5.8.	Dış ortam sıcaklığı 15°C için kesitte sıcaklıkların karşılaştırılması, a)AA' kesitinde sıcaklık değerleri, b) BB' kesitinde sıcaklık değerleri, c) CC' kesitinde sıcaklık değerleri, d) DD' kesitinde sıcaklık değerleri	86
5.9.	T1'e ait DOS-Yığın içi sıcaklık grafiği.	89
5.10.	Yığının sıcaklık haritası, a) Zeminden 1 m ve b) Zeminden 2 m yükseklikteki sıcaklık dağılımının eş sıcaklık eğrileri ile gösterimi, c) Zeminden 1 m ve d) Zeminden 2 m'deki sıcaklık dağılımının gri tonlarla gösterimi	92
5.11.	Yığın içindeki sıcaklık dağılımının, a) Zeminden 1 m ve b) Zeminden 2 m'deki perspektif olarak gösterimi; c) Zeminden 1 m ve d) Zeminden 2 m'deki renklerle gösterim; e) Zeminden 1 m ve 2 m'deki perspektif görüşlerin üst üste çakıştırılarak gösterimi, f) Zeminden 1 m ve 2 m'deki renkli görüşlerin üst üste çakıştırılarak gösterimi	95

## 1. GİRİŞ

Kömürün kendiliğinden yanma özelliği, kömür madenciliğinin en önemli sorunlarından birisini oluşturmaktadır. Kendiliğinden yanma, pek çok faktörün etkisi altında olan son derece karmaşık bir ekzotermik olaydır. Bu olay, ekzotermik reaksiyonlar sonucu açığa çıkan ısının, çeşitli faktörlere bağlı olarak kaybedilen ısıdan fazla olması durumunda kömür bünyesinde oluşan sıcaklık artışının bir sonucudur. Kömürlerdeki bu sıcaklık artışı durdurulamadığı ve oluşan sıcaklık uzaklaştırılmadığı sürece, kendiliğinden yanma olayı kaçınılmaz son olacaktır. Kömürün kendiliğinden yanması, kömürün her zaman oksijen ile reaksiyona girebilir olması sebebiyle kömür ocaklarında, kömürlerin uzun mesafeli taşımacılığında, kapalı kömür silolarında ve açık yığın depolanmasında meydana gelen önemli ve hiçbir zaman arzu edilmeyen bir olaydır.

Enerji üretim tesisleri stoklu çalışmak zorunda oldukları için, en büyük sorunlarından birisi stoklarındaki kömürlerin kendiliğinden yanmasıdır. Türkiye Kömür İşletmeleri (TKİ) ve Türkiye Elektrik Anonim Şirketi (TEAŞ) tarafından üretilen yaklaşık 59 milyon ton kömür ve özel sektör tarafından üretilen 6.5 milyon ton kömürün, 56 milyon tonu enerji üretim tesislerinde, geri kalan kısım ise ev ısınmasında ve sanayiinin ihtiyacında kullanılmaktadır (TMMOB-MMO, 2002). Türkiye’de mevcut 11 adet enerji üretim tesisi vardır (EN-BAK, 2003). Bu tesislerden Tunçbilek enerji üretim tesisinin kömür stok sahasında her zaman en az 5000 ton kömür bulunmaktadır. Aynı şekilde Seyitömer enerji üretim tesisinin kömür stok sahasında da sürekli olarak 5000 ton kömür stoğu vardır. Diğer enerji üretim tesislerinin stoklarında ortalama olarak 90.000 ton kömür bulunmaktadır. Bu stoklardaki kömürlerde kendiliğinden yanma olayları sık sık görülmektedir. TKİ’ye ait Soma ve Tunçbilek kömür hazırlama tesislerinde yıllık 9 milyon tonluk kömür işlenmektedir. Üretim fazlası kömürler stok sahasında bekletilmektedir. Garp Linyitleri Tunçbilek Kömür İşletmesi’nde son 10 yıllık stoklarda, yangın sonucu oluşan tahmini kömür kayıpları yaklaşık 500.000 ile 1.000.000 tondur. Ayrıca, dışalım yoluyla yurtdışından her yıl yaklaşık olarak 12 milyon ton kömür alınmaktadır (Anaç, 2003). Bu kömürlerin uzun mesafeli taşımacılığında ve stok

sahasında beklemesi sonucu önemli sorunlar oluşmaktadır. Bu problemler, kömür madenciliğinde çok ciddi ekonomik kayıplara sebep olmaktadır. Bu nedenle kömürlerin kendiliğinden yanma şartlarının biliniyor olması, yanma olayının önceden tespiti ve buna göre de gerekli tedbirlerin alınması açısından büyük önem arz etmektedir.

Kömürün kendiliğinden yanması olayı, uzun yıllardan beri bir çok araştırmacının ilgisini çeken bir olay olmuştur. Günümüze kadar yapılan çalışmaların büyük bir çoğunluğu, kömürün yanma mekanizmasını açıklayabilmek ve kömürleri kendiliğinden yanmaya göre sınıflandırabilmek amacıyla laboratuvar ölçekli deney düzenekleri ile yapılmıştır.

1950'lerden itibaren bu konu üzerine çalışan araştırmacılar, çeşitli modeller üzerinde yoğunlaşmışlardır. Bilgisayar kullanımının yaygınlaşmasına kadar olan süreçte yapılan ilk model çalışmaları, çok basit çerçevede kalmıştır. Bilgisayarın kullanılmasından itibaren çok kapsamlı modeller literatürde yerini almıştır.

Ancak günümüze kadar yapılan bu kapsamlı çalışmalar, kendiliğinden yanma olayını etkileyen parametrelerin bazıları üzerinde kesin bir fikir birliği oluşturamamıştır. Yapılan çalışmalarda, çeşitli parametrelerin ve mekanizmaların yanma üzerinde farklı derecede etkili oldukları öne sürülmüştür.

Kömürün kendiliğinden yanması, iç ve dış olmak üzere çeşitli faktörlere bağlıdır. Kömürün fiziksel ve kimyasal özellikleri ile ilgili olarak kömürleşme derecesi, kömürün nem içeriği ve değişimi, kömürün iç yapısı ve tane boyutu birinci derecede etkin olan iç faktörlerdendir. Dış faktörlerden ortam havasının sıcaklığı, nemi, stoklanma şekli, oksijen ile teması aynı şekilde kendiliğinden yanma olayında birinci derecede etkin olan parametrelerdendir.

Ülkemizde üretilen kömürlerin büyük bir kısmının, genç kuşak kömür olarak adlandırılan kömürlerden oluşması ve bunların kendiliğinden yanmaya yatkınlığı sebebiyle, kendiliğinden yanma olayının incelenmesi, ekonomiye etkisi açısından önem arz etmektedir. Çünkü sadece kömürün kendiliğinden yanması sebebiyle, çok ciddi miktarlarda ekonomik kayıplar söz konusu olmaktadır.

Ülkemizde kendiliğinden yanma konusunda şimdiye kadar yapılan çalışmaların pek çoğu, kömür numunelerinden gram mertebelerinde alınıp,

laboratuvar ortamlarında çeşitli kabuller altında yapılan, deney yöntemine ve deney şartlarına bağlı olan çalışmalardan oluşmaktadır. Oysa kendiliğinden yanma da kullanılan testlerin, gerçek kömür stoklarında birçok parametrenin etkisi altında oluşan kendiliğinden yanma olayını karakterize etmesi oldukça zordur. Bu nedenle, yerinde yapılan büyük ölçekli çalışmalar aynı bir öneme sahiptir.

Toplam altı bölüm altında sunulan bu çalışmada, gerçek boyutlardaki stok sahalarında depo edilen kömürlerin kendiliğinden yanma olayı incelenmiştir. Doktora tezine ait bölümlerin içeriği ise aşağıda kısaca özetlenmiştir:

Bölüm 2’de, kendiliğinden yanma olayının nasıl oluştuğunu ve kömürün kendiliğinden yanmasını etkileyen iç faktörlerden kömürleşme derecesi, nem, pirit içeriği, petrografik bileşenler, tane boyutu, mineral madde içeriği, dış faktörlerden olan atmosferik koşullar, maden işletme yöntemi ve jeolojik yapı detaylı olarak incelenmiştir.

Bölüm 3’de, kömürlerin kendiliğinden yanma olayında çalışmalar yapılırken veya sonuçlarına ulaşılırken farklı deney yöntemlerine dayanan çeşitli sınıflama teknikleri incelenmiştir. Kendiliğinden yanma olayının incelenmesini araştıran laboratuvar ölçekli çalışmalar, büyük ölçekli veya gerçek boyutlarda yapılan çalışmalar ile teorik çalışmalar anlatılmıştır. Ayrıca, literatür de şimdiye kadar stok kömürler üzerinde yapılan teorik ve deneysel çalışmalara yer verilmiştir.

Bölüm 4’de, Garp Linyitleri İşletmesi’nin tanıtılması, oluşturulan stoğun ve araştırmada kullanılan aletlerin tanıtılması, bu amaç için geliştirilen bilgisayar programı ve araziden alınan verilerin düzenlenmesine yer verilmiştir.

Bölüm 5’de, kömür stoklarından elde edilen veriler ile kendiliğinden yanma da etkili olan parametreler arasındaki ilişkiler, istatistik çalışma olan regresyon analizi teknikleri ve sonlu elemanlar metodu ile incelenmiştir. Ayrıca yığın içi sıcaklık haritaları çıkarılmıştır.

Bölüm 6’de, sunulan bu çalışmada elde edilen sonuçlar ve öneriler verilmiştir.

## 2. KÖMÜRÜN KENDİLİĞİNDEN YANMASI

### 2.1. Tanımlar ve Genel Bilgiler

Kömür, havadaki oksijenle doğrudan yanabilen % 55-95 arasında karbon, % 2-20 oksijen, % 2-8 hidrojen, % 2'den az azot, % 7-8'e kadar çıkabilen oranlarda kükürt içeren, organik kökenli, tortul bir kayadır. Kömürler, uygun ortamlarda biriken bitki kalıntılarının, zamanla fiziksel ve kimyasal etkiler sonucunda değişime uğramasıyla oluşmaktadır. Bu kömürleşme işlemi sürecinde, bitkisel birikimlerin çeşitli basınç ve sıcaklık koşullarının etkisi altında, kimyasal değişikliklere uğrayarak sürekli hidrojen ve oksijen açığa çıkarmasıyla, kömürler turbadan linyite ve daha yüksek ranklı antrasite dönüşürler (Nakoman, 1971; Lauredeau, 1978; Buzkan, 1990). Çizelge 2.1'den görüleceği üzere, kömür rankı arttıkça kömürün karbon yüzdesi ve ısıl değeri artarken; oksijen, hidrojen, uçucu madde ve nem oranı azalmaktadır (Tsai, 1982).

Çizelge 2.1. Çeşitli kömür türlerinin özellikleri (Tsai, 1982).

Kömürleşme Derecesi	Uçucu Madde İçeriği (%)	Karbon İçeriği (%)	Kalorifik Değer (kcal/kg)	Nem (%)
1) Linyit	69-44	76-62	4600-3500	52-30
2) Alt bitümlü	52-40	80-71	6400-4600	30-12
3) Bitümlü				
a- Yüksek uçuculu-B	50-29	86-76	7250-5800	15-2
b- Yüksek uçuculu-A	49-31	88-78	7750	5-1
c- Orta uçuculu	31-22	91-86	7750	5-1
d- Düşük uçuculu	22-14	91-86	7750	5-1
4) Antrasit	14-2	99-91	7750	5-1

Yapılan çalışmaların ışığı altında, kömürleşme derecesi (rank) arttıkça, kömürün kendiliğinden yanmaya eğilimleri azalmaktadır. Kömür bünyesinde bulunan oksijen, hidrojen ve uçucu madde miktarları fazla ise kömürün kendiliğinden yanmaya yatkınlıkları artmaktadır (Chamberlain ve Hall, 1973; Nordon ve ark., 1979; Ismail ve Walker, 1989).

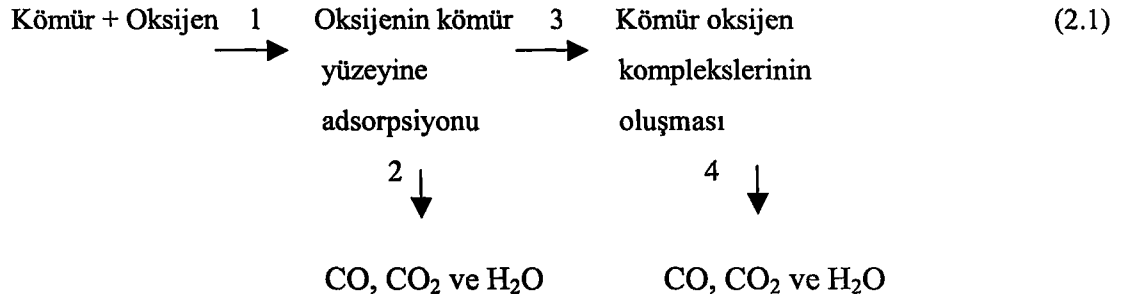
## 2.2. Kömürün Kendiliğinden Yanması

Kömürün atmosfer ile teması sırasında havadan oksijen absorbe etmesiyle başlayan ve oksitlenme ile devam eden, ortamda ısı birikimi ile açık alevli yangına kadar dönüşebilen olaya “kendiliğinden yanma” adı verilir.

Kömürün yapısında bulunan tüm organik bileşenler, havayla temas ederek reaksiyona girerler. Ekzotermik reaksiyon olan bu tepkime sonucunda, serbestleşme enerjisi olarak ısı açığa çıkar. Bu ısı ortamın sıcaklığını artırarak, oksitlenmeyi daha da hızlandırmaktadır. Bu olay sonucunda ısı birikimi giderek artmaktadır. Açığa çıkan bu ısının, soğutma hızından yüksek olması durumunda ortam ısısı gittikçe artmakta ve sonuçta kendiliğinden kızışma, açık alevli yangına dönüşmektedir (Gill ve Browning, 1971; Lord, 1986). Diğer bir deyişle, oksijen moleküllerinin kömür yüzeyine adsorpsiyonu sonrası burada oluşan ısı iletimi, ısı taşınım ve difüzyon mekanizmalarının etkisiyle kimyasal bir reaksiyona dönüşür (Ünver ve Özözen, 1998).

Yukarıda anlatılan reaksiyon mekanizması oldukça karmaşıktır. Meydana gelen reaksiyon eşitliği aşağıda verilmiştir. (Güney, 1968; Karsner ve Perlmutter, 1982; Ökten ve ark., 1998).





Eşitlikten görüleceği üzere üç reaksiyon gerçekleşmektedir. Birinci reaksiyonda, tersinir olaylardan meydana gelen oksijen moleküllerini açığa çıkaran bileşikler, son derece kararsızdırlar (Porter ve Ralsten, 1914). İkinci reaksiyon ise kimyasal adsorpsiyon olayını içerir. Birinci ve ikinci reaksiyonlarda oluşan bu fiziksel ve kimyasal adsorpsiyon olaylar sonucunda, ortaya kömür reaksiyon kompleksleri ve peroksitler çıkar (Chamberlain ve ark., 1976). Bu sırada kömür devamlı oksijen adsorbe ettiğinden dolayı kütlelerinde belirli bir artış olur. Üçüncü reaksiyon tamamen kimyasal bir olay olup, oluşan kömür - oksijen gruplarının çözünmesi ile yanma ürünleri açığa çıkar. Bundan dolayı kömürde bir kütle azalması meydana gelir (Akgün, 1994). Bu olay Çizelge 2.2'de verilmiştir (Demirbilek, 1986).

Çizelge 2.2. Kömürün oksijen adsorpsiyonuna sıcaklığın etkisi (Demirbilek, 1986).

Sıcaklık	-80°C	-5°C	40°C
Adsorpsiyon	Fiziksel adsorpsiyon	⇒ Kimyasal adsorpsiyon	⇒ Kimyasal reaksiyon

Yapılan çalışmalar, oksijenin kömüre fiziksel olarak adsorpsiyonunun -80°C'de başladığını göstermiştir. Ayrıca sıcaklık artışı ile fiziksel adsorpsiyonun azaldığı ve yaklaşık olarak 40°C'den sonra ihmal edilebilir olduğunu vurgulamıştır (Sevenster, 1961).



Bu konuda yapılan diğer çalışmalarda da kömürün oksidasyon olayının ekzotermik bir reaksiyon olduğu ve oksidasyon sırasında dışarıya ısı verdiği ifade edilmektedir (Jones ve Towned, 1949; Berkem ve ark., 1994; Yörükoğulları, 1997). Açığa çıkan ısı, hava akımıyla taşınarak, oksidasyon bölgesini terk eder ve ortam sıcaklığında fazla bir değişmeye neden olmaz. Ancak, bu ısı artışı ortamdan uzaklaştırılmaz ise reaksiyon bölgesinde sıcaklık yükselir. Ortam sıcaklığının 70°C ulaşp daha da artmasıyla kömür-oksijen kompleksleri ayrışır. Bu sıcaklığın artmasıyla CO, CO<sub>2</sub> gibi yanma ürünü açığa çıkan gazların yayılımı da artmaktadır (Jones ve Towned, 1949). 100°C civarında kömürde bulunan su buharlaşır ve H<sub>2</sub> gazı çıkışı artar. Sıcaklığın gittikçe artmasıyla CO, CO<sub>2</sub> ve H<sub>2</sub> gazları yayılımı da artar. 150°C dolayında etilen ve propilen gazları yayılımı başlar. Daha sonra ortam koşullarının uygun olması durumunda kendiliğinden yanma sıcaklığının 175°C'nin üstüne çıkmasıyla da açık alevli yangına dönüşerek kıvışmanın son noktasına ulaşılır (Ökten ve ark., 1998). Buraya kadarki açıklamalar, Demirbilek (1986) tarafından Çizelge 2.3'de özetlenmiştir.

Çizelge 2.3. Oksidasyon sonucu yangınların oluşması (Demirbilek, 1986).

Sıcaklık < 80°C	Uygun şartlar	Sıcaklık >80°C	Yangınlar
Kararlı kömür oksijen karışımlarının oluşumu ve ısı açığa çıkışı	Kızıışmanın hızlanması	Kömür oksijen karışımlarının bozuşması ve ısı açığa çıkışı	Isı artışı ve tutuşma

### 2.3. Kendiliğinden Yanma Olayına Etki Eden Faktörler

Kömürün karmaşık yapısı nedeniyle, kendiliğinden yanma olayında etkin olan pek çok faktör vardır. Bu parametreler iç (endojen) ve dış (ekzojen) olmak üzere iki gruba toplanmıştır. İç faktörler, kömürün fiziksel, kimyasal ve petrografik özelliklerini kapsamaktadır. Kömürün üretilmesi ve stoklanması sırasındaki atmosferik şartlar ile maden ocağında uygulanan madencilik teknikleri ve jeolojik yapı ise dışsal faktörlerdir (Kural, 1991). Bu faktörler Çizelge 2.4’de verilmiştir (Güney 1968; 1971).

Çizelge 2.4. Kömürün kendiliğinden yanmasını etkileyen faktörler (Kural, 1991).

İÇ FAKTÖRLER	DIŞ FAKTÖRLER	
Kömürün Fiziksel, Kimyasal ve Petrografik özellikleri	Atmosferik Koşullar	Madencilik Tekniği ve Jeolojik Yapı
-Kömürleşme Derecesi (Rank)	-Sıcaklık	-İşletme Koşulları
-Nem	-Nem	-Havalandırma Koşulları
-Pirit İçeriği	-Oksijen Oranı	-Damar ve Yantaşın Özellikleri
-Petrografik Bileşenler	-Hava Basıncı	
-Tane Boyutu		
-Mineral Madde İçeriği		

#### 2.3.1. İç faktörler

##### 2.3.1.1. Kömürleşme derecesi

Kömürleşme derecesi, kömürün oluştuğu havzanın orijinal bitki yapısına, oluşumu sırasında uğradığı koşullara ve oluşum sürecine bağlıdır. Kömürdeki karbon içeriğinin artması ve oksijen içeriğinin azalması ile rankın arttığı gözlenmiştir. Kömür rankı arttıkça kömürün karbon yüzdesi ve ısıl değeri artmakta, buna karşılık

oksijen, hidrojen, uçucu madde ve nem oranı azalmaktadır. Turbadan antrasite doğru gidildikçe, yüksek ranklı kömürlerde oksidasyon olayı yavaşlamaktadır. Diğer bir ifade ile kömürün rankı arttıkça, oksijen adsorplayabilme özelliği azalmaktadır. Bunun en önemli sebebi, düşük ranklı kömürlerde daha fazla reaktif oksijenin olması ve gözenek boyutlarının artmasıyla oksijen moleküllerinin adsorpsiyonu için daha uygun şartların oluşmasıdır (Kröger ve Beier, 1962; Chamberlain ve ark., 1970; Chamberlain ve Hall, 1973; Morris ve Atkinson, 1988).

Genel olarak kömür rankı azaldıkça, kömürlerin kendiliğinden yanmaya yatkınlıkları artmaktadır. Örneğin, linyitler kendiliğinden yanmaya daha çok yatkın iken antrasitlerde kızışma olasılığı daha az olmaktadır.

### 2.3.1.2. Petrografik bileşenler

Kömür yapısı itibariyle heterojen bir maddedir. Kömürlerde bulunan değişik fiziksel ve kimyasal yapıdaki oluşumlar, genellikle bandlı yapıdadır. Çıplak gözle görülebilen bu bandlı bileşenlere “litotip” denir ve bunlar fusen, duren, klaren ve vitren’dir. Bu litotipleri meydana getiren gözle görülemeyecek kadar küçük bitki parçacıklarına da maserel adı verilir. Bunlarda vitrinit, eksinit ve inertinit’tir (Ateşok, 1986).

Vitrinit’in orijini odunsu dokulardır ve kömürün molekül yapısında aromatik olmayan bölümleri oluşturmaktadır. Bu yapıda oksijenin çok düşük aktivasyon enerjilerinde ve hızlı olarak adsorbe edilmesiyle, düşük sıcaklıklardaki oksidasyonun ilk aşaması oluşmaktadır. Eksinit, kömür yapısında hidrojen zengin bölümlerden oluşmuştur. Bunun da kökeni bitkisel dokulardır. İntertinit, kömür bünyesindeki yoğun aromatik yapıyı oluşturur ve yüksek miktarda kömüre dönüşmüş dokulardan meydana gelmektedir. Kömürde en fazla gözenekli ve en az reaktif masereldir (Akgün, 1994).

İngiliz Araştırma Kurumu tarafından yapılan çalışmalar, kömürün petrografik bileşenlerinden olan fusenin en az reaktif olduğunu, genelde durenin, vitrenden daha reaktif olduğunu göstermiştir. 74°C’nin üstündeki sıcaklıklarda eksinitin, vitrinit ve

inertiniten çok daha yüksek bir oksidasyon hızına sahip olduğu belirlenmiştir (Morris ve Atkinson, 1988).

Kömürün petrografik yapısını oluşturan bu maserallerin kömürde bulunma oranları dikkate alınarak, kömürler kendiliğinden yanmaya karşı yatkınlıklarına göre sınıflandırılmaktadır. Vitritin oksijeni hızlı olarak adsorbe edebilmesi sebebiyle, bünyesinde fazla miktarda vitrit bulunduran kömürler kendiliğinden yanmaya daha yatkın olmaktadır (Akgün, 1994).

### 2.3.1.3. Nem içeriği

Kömür bünyesindeki nemin ve bu nem miktarında olabilecek değişimler, kömürlerin kendiliğinden yanmasında çok önemli bir etkiye sahiptir. Nem içeriğinin kömürün kendiliğinden yanması üzerinde farklı etkilerini ayrı ayrı incelemek, oldukça karmaşık ve zor bir işlemdir. Bu nedenle, yapılan çalışmalar üzerinde farklı düşünceler ortaya çıkmıştır. Bu konuda çalışan bazı araştırmacılar, nem içeriğinin direkt olarak bir yangına yatkınlık indeksi olabileceğini önermektedirler (Saraç, 1992).

Nem, kömürde farklı özelliklerde bulunmaktadır. Bunlar, kimyasal olarak bağlı bulunan nem, fiziksel-kimyasal kuvvetler etkisinde adsorbe olan nem ve mekanik kuvvetler neticesi oluşan serbest nem olarak üç gruba ayrılır. Reaksiyon yüzeylerini tek veya çok katlı tabakalar halinde çevreleyen fazla miktardaki nem, oksijenin aktif yüzeylere ulaşmasına engel olurlar. Diğer bir ifade ile kömürdeki yüksek miktardaki nem, oksijenin reaksiyon yüzeylerine ulaşmasını zorlaştırır ve oksidasyon hızını yavaşlatır (Nordon ve ark., 1979; Banerjee, 1985).

Genel olarak düşük miktardaki nem içeriğinin kendiliğinden yanmayı hızlandırdığı, yüksek nemin ise oksidasyon olayını geciktirdiği söylenebilir (Veslovsky, 1957). Yapılan çalışmalarda bu kritik nem oranının, kömürün cinsine bağlı olarak % 0.5-8 arasında değiştiği görülmektedir (Panaseiko, 1974). Nandy ve arkadaşlarının (1972) yaptıkları çalışmalarda, optimum nem oranının % 5 civarında olduğu görülmüştür. Ayrıca kömür tarafından adsorbe olan nemin, bazı peroksit

bileşiklerinin oluşumunda katalitik etkisi oluşturduğu görülmektedir (Ghosh, 1986). Özellikle kararsız olan hidroperoksitlerin oluşması için neme gereksinim vardır ve bunlar oluşurken sıcaklık artışına neden olmaktadır. Bu durum, stok sahalarındaki kömür yığınlarının özellikle yağmurlu havalarda kendiliğinden tutuşmasının bir nedeni olarak görülmektedir (Hodges ve Hinsley, 1964).

#### 2.3.1.4. Kömürün tane boyutu

Tane boyutu küçük olan kömürlerde oksijen adsorpsiyonu daha aktiftir ve kızışmaya yatkınlık daha fazladır. Şimdiye kadar yapılan bir çok çalışmada araştırmacılar, tane çapı küçük kömür parçacıklarının daha fazla yüzey alanına sahip olduğu ve tane boyutu büyük kömürlerden çok daha fazla oksijen adsorbe edebileceği gerçeğini vurgulamışlardır. Adsorpsiyonun hızlı olması, sıcaklıkta artışa neden olmakta, böylece sıcaklık artışı ile adsorpsiyon daha da hızlanarak kendiliğinden tutuşmayı hızlandırmaktadır (Sondreal ve Ellman, 1974; Morris ve Atkinson, 1988).

Kömürün tane çapının küçültülerek yüzey alanının artmasından dolayı, hava ile temas yüzeyi arttığı, iri kömürlerde ise yüzey alanı az olduğundan oksitlenmenin yüzeylerde kaldığı, derinlere ulaşamadığı yine araştırmacılar tarafından ortaya konmuştur (Coward, 1957).

Carpenter ve Sergeant (1966) yaptıkları çalışmada, kömür tane çapının azalması ile oksidasyon hızının arttığını ve belli bir kritik boyuttan sonra oksidasyon hızında artık herhangi bir artışın olmadığını gözlemlemişlerdir.

Bu kritik çapı ise Carpenter ve Sergeant (1966), oksidasyonun ilk beş saat içerisindeki değişimine bağlı olarak 138-387  $\mu\text{m}$  arasında, Palmer ve arkadaşları (1990) 501  $\mu\text{m}$ , Kaji ve arkadaşları (1985) 1 mm, Karsner ve Pelmutter 2,31 mm ve Sondreal ve Ellman (1974) ise 5 mm gibi değişen bir aralıkta bulmuşlardır. Kritik çapın değişik çıkması, deney şartlarının özelliğinden ve farklı kömür tiplerinden kaynaklanmakla birlikte gözeneklilik, kömür reaktivitesi vs. gibi daha bir çok parametrelerin etkisinden olduğu söylenebilir.

### 2.3.1.5. Mineral madde içeriği

Kömürün mineral maddesi, ana yapısını oluşturan organik maddelerin dışında kalan elementlerin toplamıdır. Kömürlerde görülen mineral maddeler; şeyl grubu mineraller (Muskovit, Biotit, Montmorillonit vs.), kaolin grubu mineraller (Kaolinit vs.), sülfür mineralleri (Pirit, Markasit), karbonat mineralleri (Kalsit, Ankerit), klorür mineralleri (Tuz) gibi gruplara ayrılırlar (Ateşok, 1986).

Kömürlerde kül miktarı arttıkça, kömürün ana yapısını oluşturan karbon miktarı azalacağından dolayı kendiliğinden yanmaya yatkınlık azalacaktır. Ancak külde bulunan kireç, soda, demir bileşikleri gibi maddelerin, oksidasyonu hızlandırıcı bir etki yaptığı, alüminyum, silis gibi maddelerinde yavaşlatıcı etkisi olduğu ortaya çıkmıştır (Didari, 1986).

### 2.3.1.6. Pirit içeriği

Bu yüzyılın başlarına kadar kömürdeki pirit, kendiliğinden yanmanın temel nedeni olarak kabul edilmekteydi. Fakat daha sonra yapılan kapsamlı çalışmalar, bunun böyle olmadığını ortaya koymuştur. Yanma olayında etkili olan faktörlerin belirlenmesi, pirit içermeyen kömürlerde de kendiliğinden tutuşmanın meydana gelmesi veya pirit içeriği yüksek kömürlerin kendiliğinden yanma riskinin düşük olarak çıkabilmesinden dolayı pirit içeriğinin kendiliğinden yanmada belirleyici bir özellik olmadığı anlaşılmıştır (Ünver, 1997).

Kömürdeki kükürdün belli şartlarda kendiliğinden yanmaya önemli katkısı iki şekilde olmaktadır. Kükürdün oksidasyonu sonucu açığa çıkan ısı, sıcaklığın artmasına sebep olurken reaksiyonu da hızlandırmaktadır. Diğer taraftan kömürdeki kükürdün oksitlenmesi neticesinde kömürde çatlaklar oluşmakta, buna bağlı olarak da oksidasyona uğrayacak kömür yüzey alanı artmaktadır (Ninteman, 1978).

### 2.3.2. Dış faktörler

#### 2.3.2.1. Atmosferik koşullar

Bu konuda çalışan araştırmacıların bir çoğu, kömür sıcaklığının kendiliğinden yanmanın ana faktörlerinden biri olduğu konusunda fikir birliği içerisindeyler. Kömürün kazılıp orijinal halinden koparıldıktan sonra, stoklanma anındaki başlangıç sıcaklığı oldukça belirleyicidir. Ortalama oksidasyon hızı, her 8°C'lik sıcaklık artışı ile 1,4-2,3 arasında bir kat ile artmaktadır (Morris and Atkinson, 1988). Erkan (1964) yaptığı bir çalışmada; genel olarak 30-100°C arasında, her 10°C'lik sıcaklık yükselmesi sonucunda oksidasyon hızının ortalama olarak 2,2 kat arttığını saptamıştır. Aynı sonuç, Amerika Birleşik Devletlerinde bulunan Kuzey Dakota Linyitleri üzerinde yapılan çalışmalarda da ortaya çıkmıştır (Sondreal ve Ellman, 1974). Kömür ile oksijen arasındaki reaksiyon, çok düşük sıcaklıklarda başlayabilmektedir. Bu artış sonucu kömürdeki sıcaklık artışı kendiliğinden yanma olayının bir göstergesi olarak kızışmanın erken tespitinde kullanılmaktadır. Kömür ile oksijen arasındaki oksidasyonun, kritik sıcaklık değerine kadar çok yavaş olduğu ve bu değerden sonra gaz çıkışının hızlandığı bilinmektedir. Kritik sıcaklık, kömürleşme derecesi ile değişmekte olup 30-70°C arasında bir değer almaktadır (Chamberlain ve ark.,1976).

Havada bulunan nem miktar ve kısmi basınca bağlı olarak, kömür taneleri ile hava arasında nem alış verişi olmaktadır. Bu etkileşme sırasında kömür, su buharını adsorplamaktadır. Bu nedenle de oksidasyon hızlanmakta ve sıcaklık artmaktadır. Diğer bir ifadeyle havada bulunan nemin kısmi basıncının yüksek olması durumunda, kömür havadan nem alır ve yoğunlaşma ile dışarıya ısı verir. Bu durumda da oksidasyon hızlanmaktadır (Beier, 1973). Nordon ve Bainbridge'nin (1983) yaptığı çalışmada, kömür stoklarında genellikle yağmurlu günlerde daha çok kendiliğinden yanma olayının meydana geldiği saptanmıştır. Bununla beraber havada bulunan nemin kısmi basıncının az olması durumunda, kömürdeki nem desorbe olarak buharlaşmakta ve ısı kaybı meydana gelmektedir. Bundan dolayı da kömürün soğumasına neden olmaktadır.



### 2.3.2.2. Kömür yığın gözenekliliği

Kömür yığın gözenekliliği, reaksiyon sonucu açığa çıkan ısının ve su buharının dış ortama transferi ile reaksiyon için gerekli olan oksijenin reaksiyon bölgesine ulaşması olayındaki önemi sebebiyle, stoklanan kömürlerde kendiliğinden yanmanın azaltılmasında önemli rol oynamaktadır. Yığının sıkışması, kömür tane boyutu ile farklılık gösterir. Stoklama sırasında yapılan sıkıştırma işlemine bağlı olarak, gözeneklilik % 5 - 40 arasında değişmektedir (Schmal, 1989).

Çok küçük gözenekliliğe sahip kömür yığınlarında, oksijen ve nemin etkisi ile açığa çıkan ısının transferi, difüzyon ve iletim olayları sonucu olmaktadır. Gözenekliliği az yığınlarda, dışarıdan içeriye doğru oksijenin girememesi yani reaksiyon bölgelerinde oksijen yetersizliği nedeniyle, kendiliğinden yanma riski azalmaktadır. Orta derecede gözenekliliğe sahip kömür stoklarında, difüzyonla birlikte konveksiyon olayları da oluşmaktadır. Bu haldeki konveksiyon olayının, oksijen ve nemin transferine büyük miktarda katkısı olmakta iken, açığa çıkan ısının dışarıya transferine düşük oranda etkisi olmaktadır. Dolayısıyla kendiliğinden yanma açısından büyük tehlike arz etmektedir. Yüksek gözeneklilik oranına sahip kömür yığınlarında, ısı ve kütle transferi açısından konveksiyon olayları çok etkili olmaktadır. Bu durumda üretilen ısının, büyük oranda dış ortama taşınmasından dolayı kömür yığınının sıcaklık artışları göreceli olarak daha az olacaktır. Böylece, kendiliğinden yanma riski çok azalacaktır (Akgün, 1994).

Gaz çıkış hızı, kömür yığınlarında büyük miktarda yığın gözenekliliğine, ortamdaki rüzgar hızına ve ısıl genleşme nedeniyle sıcaklığa bağlıdır. Hava akışı, bir taraftan reaksiyon için gerekli olan oksijenin kömür ile temasına sebep olurken, diğer taraftan reaksiyon ile açığa çıkan ısının ortamdaki uzaklaşmasında etkili olmaktadır. Yüksek hava hızı, reaksiyon için yığının içine büyük miktarda oksijen sağlayarak reaksiyonun devamlılığına sebep olmaktadır. Fakat üretilen ısının ve kömürde bulunan nemin ortamdaki uzaklaştırılmasına sebep olacağından, yığının soğumasına neden olacaktır. Düşük hava hızı ise ortamdaki oksijen miktarını sınırlar, ancak açığa çıkan ısının yığın içinde kalması sebebiyle çoğu kez sıcaklık artışına neden olur (Akgün, 1994).



### 2.3.2.3. Jeolojik yapı

Bir kömür madeninin jeolojik özellikleri, kendiliğinden yanmada kontrol altında tutulamayan parametrelerdendir. Kömür damarlarındaki çatlak ve kırılanmalar nedeniyle, havadaki oksijenin bu çatlak ve kırıklardan kömür içine sızması daha kolay olmaktadır. Bu durum ise, kızışmanın başlamasını artıran etmenlerin başında gelmektedir. Kalın damarlar tek bir dilimde kazılamadıklarından dolayı, ayak arkasında problemler oluşturmaktadır. Mahadevan ve Ramlu'nun (1985) yaptığı bir çalışmada, yangın bakımından en problemli ocakların, tek bir dilimde kazılamayan kalınlıktaki damarların bulunduğu ocaklar olduğu tespit edilmiştir. Kalın damarlarda işletmenin çalışma şartları gereği, taban veya tavanda kömür kazılamadan bırakılmaktadır. Ayağın ilerlemesi durumunda göçükte kalan bu kömürler, oksijen ile reaksiyona girerek kızışmayı oluşturmaktadır. Kalın damarların bulunduğu kömür ocaklarında bu problemler oldukça fazla görülmektedir.

Kömür damarının eğiminin fazla olduğu ocaklarda, kızışmanın arttığı gözlemlenmiştir. Eğimi fazla olan damarların bulunduğu ocaklarda, işletme koşulları nedeniyle kayıplar fazla olduğundan kendiliğinden yanma olayları meydana gelmektedir (Morris ve Atkinson, 1986).

Kömür damarının derinlerde olduğu ocaklarda, üst tabakanın neden olduğu kayaç basıncı nedeniyle kömürde çatlaklar oluşacaktır. Bu çatlaklara havanın sızmasıyla da reaksiyonun başlaması kaçınılmaz hale gelecektir. Ayrıca, derinlere inildikçe jeotermal gradyanın etkisiyle, doğal tabakanın sıcaklığı artmaktadır. Aynı şekilde örtü tabakasının az olduğu ocaklarda, yüzeyden kömür damarına doğru hava kaçakları oluşacaktır. Bundan dolayı da yüzeye yakın ocaklar, kendiliğinden yanmaya daha yatkın olmaktadır (Evseew, 1985).

Fayların sık karşılaştığı ocaklarda, kendiliğinden yanma olayları daha çok görülmektedir. Faylı zonlarda kırık ve çatlakların çok olması sebebiyle buralardan hava kaçakları iç kısımlara doğru ilerlemektedir. Ayrıca, panolarda sık görülen faylar sebebiyle ayak ilerleme hızları çok düşecek ve tehlikeli bölgeleri hızla

geçemeyen ayaklar, potansiyel yangın kaynaklarına kızışma için yeterli zamanı sağlayacaktır. Bu da kendiliğinden yanmaya sebep olacaktır.

#### 2.3.2.4. Maden işletme yöntemi

Kendiliğinden yanma olayı, kömür ocaklarında üretim yöntemi ile doğrudan ilişkilidir. Bu nedenledir ki işletme yöntemi seçiminde kömürün kendiliğinden yanmaya yatkınlığı araştırılarak, çalışmalar yapılması dikkat edilmesi gereken konulardan birisidir. Bir maden işletmesinde uzunayak yöntemi kullanılıyorsa, dönümlü ayaklar, ayak arkasında bulunan göçüklere hava kaçaklarını azaltarak kendiliğinden kızışmaları önlemede etkili olmaktadır. Çünkü taban yolları sağlam kömür içinde bulunduğundan hava kaçakları etkili olamayacaktır. Ayrıca, ayağın hızlı bir şekilde ilerlemesi neticesi, göçükte kalan kömürde kızışma için yeterli zaman ve hava geliri bulunamamaktadır. Eğer olabilecek kızışmalar varsa, ayak ilerlemesini etkilemediğinden önemli kayıplar olmayacaktır. Bu nedenle kendiliğinden yanmaya yatkın kömür damarlarında, dönümlü uzunayak sisteminin uygulanması daha avantajlıdır.

İlerletimli uzunayak sistemiyle çalışılan kömür ocaklarında, ayak arkasındaki göçük sürekli olarak hava sirkülasyonuna maruz kaldığından dolayı göçük içine yüksek oranda hava ulaşmaktadır. Ayak arkasından alınamayıp terk edilen kömürleri kızıştırarak kendiliğinden yanmaya sebep olacaktır.

Oda-topuk yöntemi ile çalışılan ocaklarda, bırakılan topukların, tavan basıncı ile çatlaması ve bu çatlaklardan sızan havadan dolayı kendiliğinden yanma olayına sebep verdiği bilinmektedir. Özellikle kömür damarlarının derin olduğu ocaklarda, bu yöntemin uygulanması durumunda problemlerin oluştuğu görülmektedir (Durucan ve Güyagüler, 1982). Bu sebeple topuklara gelen yüklerin hesabı yapılırken, bırakılacak topuğun boyutları ve denetimi üzerinde çok dikkatli çalışmaların yapılması gerekmektedir (Gill ve Browning, 1971; Mahadevan ve Ramlu, 1985).

Dolgulu çalışılan ayaklarda, tavana gelen yüklerin en aza indirilmesi sırasında tavanın kontrollü bir şekilde oturması sağlandığından, olabilecek bir kırılma ve çatlak en alt seviyelere inmekte ve ayak arkası göçüğe hava kaçakları engellenmektedir.

Ayak ilerleme hızı, kendiliğinden yanmada en önemli faktörlerin başında gelmektedir. Yapılan çalışmalarda kendiliğinden yanmayı önleyici olarak belirgin bir ayak ilerleme hızı verilememiştir. Ancak bilinen bir gerçek ise ayak ilerleme hızının yüksek tutulması gereğidir.

### 2.3.2.5. Havalandırma koşulları

Ocaklarda kendiliğinden yanmada önemli diğer bir unsurda havalandırma şartlarıdır. Havalandırma basıncındaki büyük farklar, heterojen bir yapıya sahip olan kömür damarı içine ve üretimi bitip terkedilmiş alanlara hava kaçaklarını artıracak ve böylece kendiliğinden yanma için çok riskli ortamlar oluşturabilecektir. Bunun yanında havalandırma basıncında düşüş de, reaksiyon sonucu başlayan ısınmanın dağıtılmasına engel olacağından tehlikeli durumlar ile karşılaşılabilir. Ayrıca, ocağa giren havanın nemi ve sıcaklığı kömürün oksidasyon oranını etkileyecektir (Humpreys ve Richmand, 1983).

Wade'nin (1988) yaptığı bir çalışmada, hava ilerleme hızının 0,1-0,9 m/dak ve oksijenin % 17'den fazla olduğu ocak şartlarında havalandırmanın tehlike oluşturacak en riskli koşul olduğu ileri sürülmüştür.

Üfleyici vantilatör sistemi ile çalışılan ocaklar, ayak arkası göçüğe olan hava kaçağının önlenmesi açısından, emici havalandırma ile çalışan ocaklardan daha az emniyetlidir. Pratik yönden bakıldığında, kömür ocaklarında emici vantilatör kullanılması eğilimi hava kaçaklarının az olması nedeniyle her zaman tercih edilir (Ayvazoğlu, 1984). Buna karşın yüzeye yakın olan ocaklarda emici sistemin uygulanması durumunda, yüzeydeki çatlaklardan hava gelmesine sebep olunabilecektir. Bu durumdaki ocaklarda, ocak içi hava basıncını yüksek tutmak, olabilecek hava kaçaklarını en aza indirecektir.

Ocak havalandırmasında amaç, büyük hacimdeki havayı dolaştırabilmek için düşük havalandırma basıncında çalışmaktır. Bu sebeple, hem hava kaçakları azaltılacak hem de açığa çıkan ısıyı dışarıya taşımak daha kolay olacaktır. Ocak içinde hareket eden havanın önündeki engeller, tavandan gelen basınç etkisiyle oluşan kesit daralmaları, regülatör ve kapılar, basınç düşüşlerine neden olmakta ve havanın istenmeyen yerlere kaçmasına yol açmaktadır.



### 3. KENDİLİĞİNDEN YANMA OLAYININ İNCELENMESİNİ ARAŞTIRAN YÖNTEMLER

Düşük sıcaklıklarda kömürlerin kendiliğinden yanmasını incelemek amacıyla bir çok teorik ve deneysel çalışma yapılmıştır. Bu çalışmalarda, kömür ile hava arasındaki etkileşimler sonucu kömürde meydana gelen değişimler, oksidasyon sonucu reaksiyon mekanizmasında etkin olan parametrelerin tespiti, kömürlerin kendiliğinden yanmaya yatkınlıklarının araştırılması, kendiliğinden yanma şartlarının tespiti gibi başlıklar altında özetlenebilir.

Bu çalışmaları yaparken veya sonuçlarına ulaşırken, farklı deney yöntemlerine dayanan veya çevre koşullarını değerlendiren çeşitli sınıflama teknikleri geliştirilmiştir. Bu konuda çeşitli ülkelerde değişik teknikler kullanılmasına rağmen, bu yöntemlerin hiçbiri yaygın bir kullanıma sahip değildir (Denby ve Ren, 1992).

Kendiliğinden yanma olayının incelenmesini araştıran yöntemler, üç ana grupta sınıflandırılabilir (Şensöğüt, 1997; Şensöğüt ve Çınar, 1999):

- 1- Laboratuvar ölçekli çalışmalar,
- 2- Büyük ölçekli veya gerçek boyutlarda yapılan çalışmalar ve
- 3- Teorik çalışmalar.

#### 3.1. Laboratuvar Ölçekli Çalışmalar

Bu çalışmalar, kömür damarının kendiliğinden tutuşma özelliklerinin belirlenmesi için çeşitli deney koşulları yardımı ile gram mertebelerinde kömür örnekleri alınarak laboratuvarlarda yapılan çalışmalardır. Laboratuvar ölçekli çalışmaları bir çok araştırmacı gerçekleştirmiştir (Güney ve ark., 1969; Chamberlain ve ark.,1973; Kim, 1977; Feng, 1985; Smith ve Lazzara, 1987; Akgün, 1994).

Laboratuvar ölçekli çalışmalar, kömür numunelerinin belli bir hava akımında kontrollü olarak ısıtılarak, kömürün davranışının izlenmesi esasına dayanmaktadır. Bu yöntemle yapılan çalışmalarda deney sürelerinin kısa olması, deneylerin ekonomik ve kolayca yapılabilmesi ve sistemin tamamen kontrol edilebilir olması gibi çok fazla üstünlük oluşturacak yönler vardır. Bunun yanında, deneyde kullanılan kömür örneklerinin son derece az olması nedeniyle, elde edilen sonuçların pratik açıdan, kömürün kendiliğinden yanması olayını bire bir olarak temsil etmesi zordur. Diğer bir anlatımla, ocak şartlarında kendiliğinden yanma olayını karakterize etmesi oldukça sınırlıdır.

### 3.1.1. İzotermal kalorimetre yöntemi

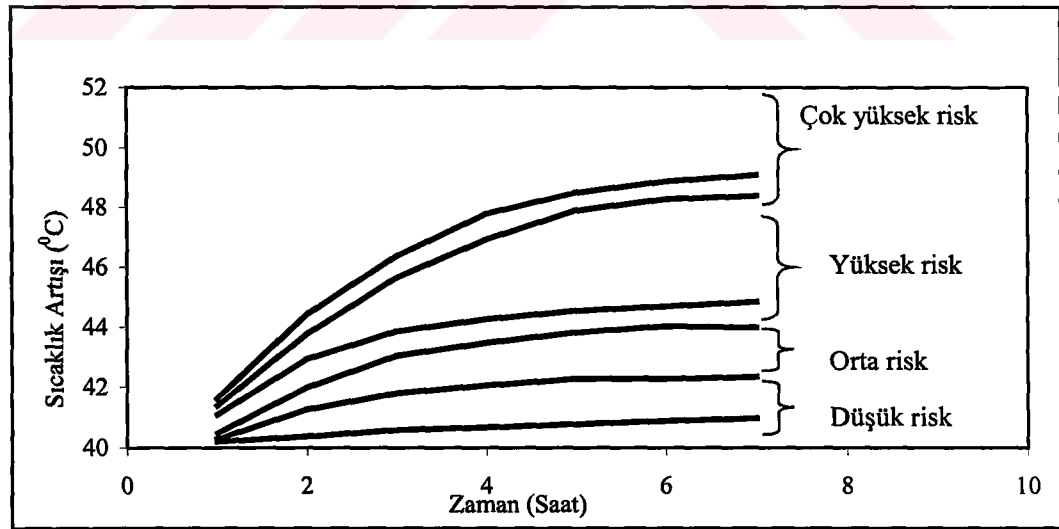
Bu yöntemde kömür numuneleri sabit tutulan bir sıcaklık ortamında, bir fırın içerisine konularak gaz akışına tabii tutulmaktadır. Kömür örneğinde oksidasyon nedeniyle meydana gelen sıcaklık artışı termoçiftlerle ölçülmekte ve üretilen ısı miktarı ile kendiliğinden yanma arasında ilişki kurulmaya çalışılmaktadır (Kim, 1977; Kaji ve ark., 1987; Palmer ve ark., 1990; Ramlu, 1991).

Kömür örneği üzerinden bu yöntemle yapılan çalışmalarda, çeşitli gazlar (hava, O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, vs.) geçirilmektedir. Deneylerde sabit sıcaklıkta tüketilen oksijen ve açığa çıkan reaksiyon ürünleri ölçülerek, bu değerlere göre reaksiyon hızlarının zamana bağlı değişimleri bulunabilmektedir. Deney çalışma parametreleri sabit tutulabildiğinden, belli şartlarda kömür reaktivitesinde oluşan zamana bağlı değişimleri tespit etmek oldukça kolay olmaktadır.

### 3.1.2. Adyabatik oksidasyon yöntemi

Bu yöntemde, kömür numuneleri, dış ortamdan etkilenmeyen sızdırmaz bir kab içerisinde konularak, hava akışına maruz bırakılmaktadır. Adyabatik oksidasyon yönteminde, kömürdeki reaksiyonlar sonucu açığa çıkan ısı, tamamen kömür içinde kaldığından sıcaklık artışları kolayca sağlanabilmektedir. Deneyin başlangıç aşamalarında çok yavaş olan bu sıcaklık artışları, zamanla hızlanarak gittikçe artmaktadır. Bir çok araştırmacı bu yöntemle kendiliğinden yanmayı etkileyen parametreleri saptamaya çalışmışlardır (Banerjee, 1982; Singh ve ark., 1984; Guin ve ark., 1986; Ramlu, 1991; Gouws ve ark., 1991; Ren ve Richards, 1993; Ren ve Richards, 1994; Ren ve ark., 1999).

Ren ve Richards (1993), bu yöntemi ocak şartlarını en iyi temsil eden yöntem olarak önermişlerdir. Bu yöntem ile kömürlerin kendiliğinden yanmasının pratik açıdan değerlendirilmesindeki zaman-sıcaklık eğrilerinin gelişimi grafik olarak çizilir ve Şekil 3.1'deki gibi yorumlanır (Sing ve ark., 1984).



Şekil 3.1. Zaman-sıcaklık eğrisi (Sing ve ark., 1984).

Ayrıca kömürün oksidasyonu sonucu açığa çıkan reaksiyon ürünleri, tüketilen oksijen miktarı, oksidasyonun hızı ve açığa çıkan sıcaklık miktarının bu grafikler yardımı ile kolayca belirlenebildiği görülmektedir.

Adyabatik oksidasyon yöntemi ile yapılan çalışmalarda, genellikle iki parametre incelenmiştir. Bunlar kuluçka süresinin (inkübasyon periyodu) belirlenmesi ve artan sıcaklıkla birlikte oluşan sıcaklık değişimleridir. Kuluçka süresinin belirlenmesi yönteminde, kömür örnekleri adyabatik kalorimetre içinde oluşturulan nötr atmosfer altında, önceden belirlenen bir başlangıç sıcaklığına kadar ısıtılır. Reaksiyonun etkisiyle açığa çıkan sıcaklık artışı, kömür örneğinin de sıcaklığını yükseltir. Bu sıcaklık kalorimetrenin sıcaklığındaki artış miktarı ile karşılaştırılır (Kaymakçı, 1998).

### 3.1.3. Tutuşma sıcaklığı yöntemi

Bu yöntem, düşük sıcaklıklarda kömür oksidasyonu olayında doğrudan kullanılmamasına rağmen, kömürlerin kendiliğinden yanmaya olan yatkınlıklarını belirlemede kullanılmaktadır. Standart bir teknik olmamakla birlikte, bu yöntemler arasında en kabul göreni tutuşabilirlik tekniğidir (Kim, 1977).

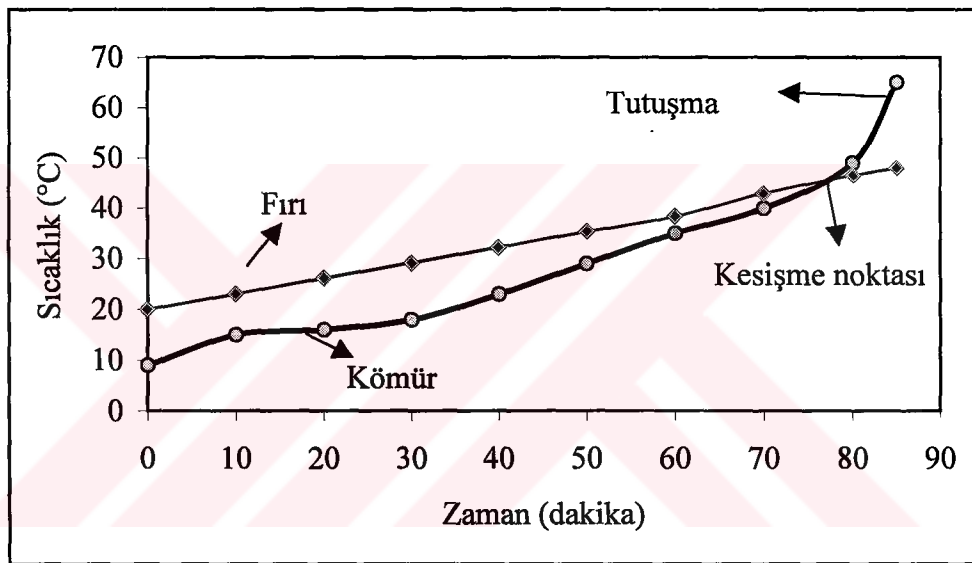
Bu yöntemde hazırlanan kömür örnekleri, sabit bir hızda ısıtılan bir ortam içerisinde hava veya oksijen akışına tabii tutulmaktadır. Bir süre sonra kömür örneği sıcaklığı ile fırın sıcaklığı kesişmektedir. Kömür sıcaklığı ile fırın sıcaklığının aynı olduğu bu sıcaklık değeri, kesişim veya tutuşma sıcaklığı olarak tanımlanmaktadır (Nandy ve ark., 1972; Gouws, 1987; Wade, 1988; Ramlu, 1991; Saraç, 1992; Didari ve ark., 1993; Kaymakçı, 1998; Şensöğüt ve Çınar, 1999).

Deney süresince kömür ve ortam sıcaklıkları, dikkatlice incelenmektedir. Deneyin başlangıcında fırın sıcaklığı, kömür sıcaklığından fazladır. Zamanla kömür sıcaklığının artmasıyla birlikte, kendiliğinden yanma olayı etkin hale gelmektedir. Bir süre sonra kömür örneği sıcaklığı, ortam sıcaklığı ile kesişmekte ve daha sonra artan bir hızla yükselerek devam etmektedir. Kesişme noktası, deney



düzenği ve deney koşullarına çok sıkı bağlıdır. Standardizasyon çok zordur. Çok fazla nem içeren kömürlerde yanıltıcı sonuçlar vermektedir (Banerjee, 1985).

Tutuşabilirlik yönteminin zaman - sıcaklık grafikleri araştırmacılar tarafından çalışmalarında ayrıntılı olarak verilmiştir (Feng ve ark., 1973; Banerjee, 1985; Wade ve Gouws, 1990; Kaymakçı ve Didari, 2000). Örnek olarak Şekil 3.2'de zaman - sıcaklık eğrileri görülmektedir.



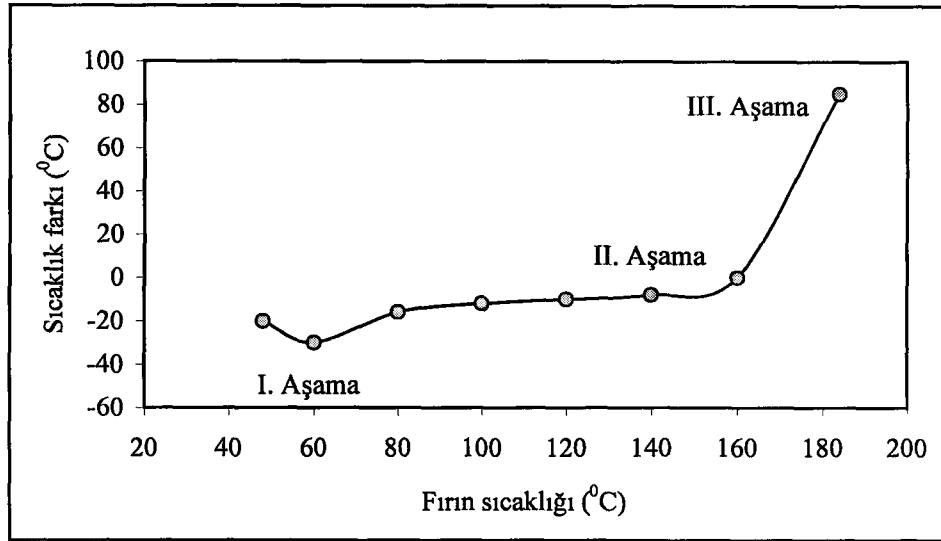
Şekil 3.2. Tipik bir zaman - sıcaklık eğrisi (Şensöğüt ve Çınar, 1998).

Bu yöntemde ön tutuşma uygulanmış kuru hava, 40 ml/dak 'lık doğrusal bir hızla tüp içinde fırına yerleştirilmiş 100 gr 'lık kömür örneği üzerinden geçirilir. Isınma hızı, deney verilerinden elde edilen zaman-sıcaklık grafiklerinden hesaplanır (Şensöğüt ve Çınar, 1998; Çınar, 1999).

### 3.1.4. Diferansiyel termik analiz (DTA) yöntemi

Bu yöntem, düşük sıcaklıklardaki kendiliğinden yanma olayının araştırılmasında sınırlı şekilde kullanılmaktadır. DTA yönteminde, kömür örneği kontrollü olarak ısıtılan hava veya nötr bir referans malzeme ile birlikte ısıtılarak, kömür ve referans malzeme arasındaki sıcaklık farkının belirlenmesi esasına dayanır (Banerjee ve Chakravorty, 1967; Tarafdar ve Guha, 1989; Bürküt ve ark., 1991; Ramlu, 1991). Bulunan bu sıcaklık farkı değerinin, test sıcaklığına göre değişimleri incelenmektedir. Elde edilen bu sonuçlar yardımı ile, meydana gelen ekzotermik ve endotermik reaksiyonların, hangi sıcaklıklarda oldukları tespit edilmektedir. Tespit edilen reaksiyonların düşük sıcaklıklarda yüksek oranda verdikleri tepe değerleri (ekzotermik reaksiyon), kömürlerin kendiliğinden yanmaya o oranda yatkın olduklarını göstermektedir.

Bu yöntem ile çalışan araştırmacılar, deneyin başlangıç aşamasında (I. aşama), kömür örneklerinin endotermik reaksiyon gösterdiğini, bunun sebebinin de kömür bünyesindeki nemin buharlaşmasından kaynaklandığını açıklamışlardır. Zamana bağlı olarak fırın sıcaklığı artmakta, dolayısıyla ekzotermik reaksiyon oluşmakta ve sıcaklık farkı da gittikçe artmaktadır (II. aşama). Sonuçta termogramın ani olarak artış gösterdiği yüksek tepe bölgesine gelinir (III. aşama). Banerjee ve Chakravorty (1967), bu yüksek artışın eğiminin, kendiliğinden yanmaya yatkınlığın göstergesi olduğunu belirtmişlerdir. Termogram olarak isimlendirilen tipik bir DTA eğrisi Şekil 3.3'de verilmiştir (Banerjee ve ark., 1972; Banerjee, 1985; Wade ve Gouws, 1990; Ramlu, 1991; Eroğlu, 1992).



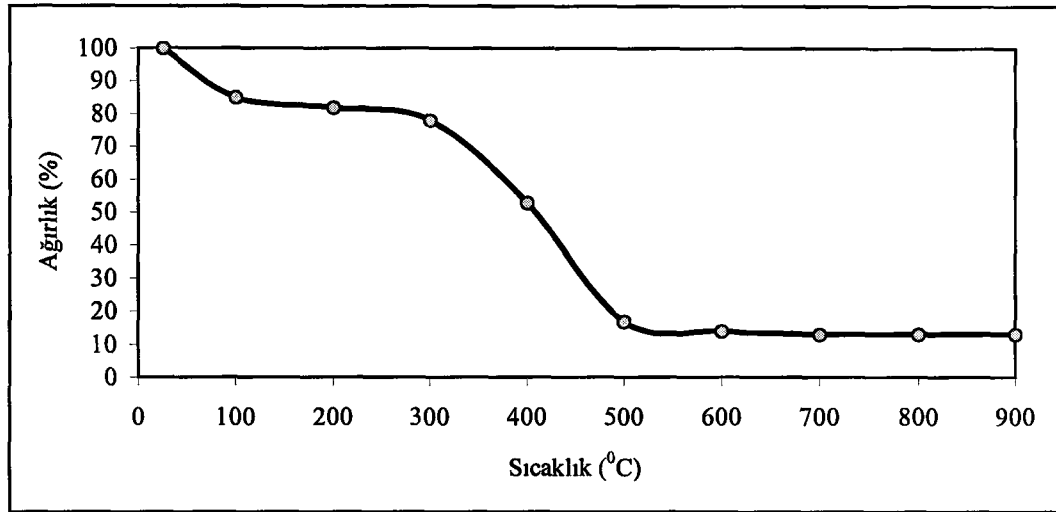
Şekil 3.3. Tipik bir DTA termogramı (Ramlu, 1991).

Aynı çalışmayı diğer araştırmacılar da farklı tane boyutlarında gerçekleştirmişlerdir (Banerjee, 1985; Eroğlu, 1992).

### 3.1.5. Termo gravimetrik analiz (TGA) yöntemi

Bu yöntemde kömür örnekleri, sabit bir sıcaklık veya kontrollü olarak ortam sıcaklığı artırılan bir fırında gaz akışına tabi tutulmaktadır. Deney süresince kömür örneklerinin kütlelerindeki değişimler tespit edilmektedir. Ayrıca oksidasyon neticesi açığa çıkan sıcaklık miktarındaki değerler ölçülmektedir (Nishimoto ve ark., 1986; İsmail ve ark., 1989).

Isınmanın başladığı ilk dakikalarda, kömür - oksijen gruplarının oluşması nedeniyle kömür örnekleri üzerinde kütle artışı meydana gelmektedir. Zamana bağlı olarak bu grupların çözünmesi nedeniyle, kömür ağırlığı gittikçe azalmaktadır. Kütledeki değişimleri veren bir grafik ile kendiliğinden yanma hakkında bilgi edinilmektedir. Özşen'in (2003) çeşitli kömürler üzerinde yaptığı çalışmadan tipik bir TGA eğrisi Şekil 3.4'de görülmektedir



Şekil 3.4. Tunçbilek kömürlerine bağlı elde edilen tipik bir TGA eğrisi (Özşen, 2003)

### 3.1.6. Olpinski yöntemi

Bu yöntemde küçük bir kömür peleti, 235°C sıcaklıkta oksidasyona tabii tutulmaktadır. 235°C'de açığa çıkan ekzotermiklik, kömürün kendiliğinden yanmaya yatkınlığını vermektedir. 200 mesh altına öğütülen 0,3 – 0,4 gr kömür, su ile nemlendirilmekte ve daha sonra sıkıştırılarak pelet hazırlanmaktadır. Pelet içine yerleştirilen termoçift ile elektronik olarak okumalar kaydedilmektedir. Oksidasyonu hızlandırmak için saniyede peletten 4-5 ml hızla hava geçirilmektedir. Oksidasyon sonucu ısı artışı, termoçiftlerle okunmaktadır. 235°C'ye kadar olan zaman – sıcaklık eğrileri çizilerek deney sona erdirilmektedir. 235°C'de eğriye çizilen teğet (Sza) ısınma hızı değerini vermektedir. Oksidasyon sonucu yanan kömürün kül içeriğindeki gerekli düzeltme yapıldıktan sonra, aşağıdaki eşitlik ile Szb bulunmaktadır (Banerjee, 1985).

$$Szb = Sza - (100/(100-\% kül)) \quad (3.1)$$

Szb'nin değerleri ile ilgili olarak Banerjee (1985) ve Denby ve Ren (1992), kömürlerin kendiliğinden yanması riski sınıflandırması yapmışlardır. Bu sınıflama izelge 3.1'de verilmektedir.

Çizelge 3.1. Olpinski risk indeksi (Denby ve Ren (1992)).

Risk sınıfı	Kendiliğinden yanmaya yatkınlık	Szb ( $^{\circ}\text{C}/\text{dak.}$ )
1	Risksiz	<80
2	Düşük riskli	80-100
3	Orta riskli	100-120
4	Yüksek riskli	>120

Szb değeri 80'nin altında ise kendiliğinden yanmaya yatkınlık düşük, 120'nin üzerinde ise yanmaya yatkınlık yüksek olmaktadır (Banerjee, 1985; Kaymakçı, 1998).

### 3.2. Büyük lekli veya Gerçek Boyutlarda Yapılan alışmalar

Laboratuvar lekli deneysel çalışmalarda kullanılan kömür örnekleri, gram mertebelerinde olmaktadır. Bu deneysel çalışmaların hemen hepsinde, kömürdeki değişken parametrelerin tamamını ve gerçek madencilik koşullarını dikkate alabilen yöntemlerin kullanılması son derece güçtür. Kömür zelliklerinin hepsi dikkatli bir şekilde tespit edilse dahi, deney sırasında geçerli olan şartları yeraltı madencilik koşulları ile veya büyük kömür stokları ile karşılaştırmak oldukça zordur. Bu nedenle, laboratuvar ölçekli çalışmalar ile kömürlerin kendiliğinden yanması olayını bir bütün olarak incelemek mümkün olmadığından, elde edilen sonuçları pratik açıdan değerlendirmek de mümkün görünmemektedir. Bu nedendir ki, kendiliğinden yanma olayı üzerinde etkin olan parametrelerin bir çoğunu kapsayan, büyük ölçekli modeller veya

işletmelerin stok sahalarındaki kömür yığınları üzerinde araştırmalar yapmak daha gerçekçi sonuçların elde edilmesine neden olacaktır.

Fakat; gerçek kömür yığınları üzerindeki bu çalışmalar için, çok daha uzun sürelere ihtiyaç duyulmaktadır. Bunun yanında en önemli zorluk, bu çalışmalar için büyük miktarlarda finans desteğine ihtiyaç duyulmasıdır. Diğer bir anlatımla ile çok pahalı bir yöntem olduğundan bu çalışmaların varlığı oldukça sınırlı sayıdadır. Aynı zamanda, hem uzun bir zaman gerektirdiğinden hem de pahalı olması nedeniyle araştırmacıların ilgisini çekmemektedir. Bu nedenle, bu tür çalışmaların sonuçlarının literatürde bulunması oldukça önemlidir.

Laboratuvar şartlarında yapılan çalışmalarda kullanılmak üzere hazırlanan deneysel modeller, zorunlu olarak farklı geometrik yapılara sahiptirler. Gerçek kömür stoğunun yığın şekli ile laboratuvardaki çalışmalarda hazırlanan deneysel modelin şekli farklı olmaktadır. Ancak, olayın oluşumunun incelenmesi yöntemi aynıdır. Büyük ölçekli deneylerde sıcaklık, oksijen ve reaksiyon ürünleri belirli periyotlarla ölçülmektedir. Elde edilen bu veriler yardımıyla, kendiliğinden yanma olayı hakkında verilere sahip olunarak gerçek bilgilere ulaşılmaya çalışılmaktadır.

### 3.3. Teorik Çalışmalar

Kömürün kendiliğinden yanması ile ilgili pek çok teorik çalışma yapılmıştır. Bu konuda yapılan çalışmalarda, konunun kimyasal ve termodinamik açıdan çok karmaşık olmasından dolayı bir veya iki boyutlu modellemeler yapılmıştır. Bu nedenle, kömürün kendiliğinden yanmasına etki eden bazı parametrelerin göz önüne alınmaması ve matematiksel hesaplamalar dışında tutulması kaçınılmaz olmuştur. Yapılan teorik çalışmalar, içerisinde çeşitli reaksiyonlar olan gözenekli ortamlardaki ısı taşınım (convection), doğal taşınım (natural convection), ısı iletimi (conduction), moleküler difüzyon ve termal reaktivite olaylarının matematiksel olarak modellenmesi esasına

dayanmaktadır. Genelde bu özelliklerin biri veya birkaçının etkisi temel alınarak model çalışmaları yapılmıştır.

Bu çalışmalar yardımı ile özellikle stok halindeki kömürlerin kendiliğinden yanmaya karşı davranışlarının belirlenmesi, güvenilir depolama koşullarının ve süresinin tespiti, kendiliğinden yanma üzerinde etkin olan parametrelerin incelenmesi, ancak belirli kabuller altında yaklaşık olarak mümkün olabilmektedir.

Teorik çalışmalarda karşılaşılan en büyük zorluk, bir çok faktöre bağlı olan kendiliğinden yanma olayında son derece karmaşık reaksiyonların bir arada olmasından kaynaklanmaktadır. Bu nedenle olayın matematiksel modellenmesi, ancak yapılacak belirli kabuller altında mümkün olabilmektedir.

### **3.4. Stok Kömürler Üzerinde Yapılan Çalışmalar**

Kömürün kendiliğinden yanma olayı üzerinde etkin olan parametrelerin büyük çoğunluğunu kapsayan, özellikle kendiliğinden yanma esnasındaki genel davranışının belirlenmesi amacıyla yönelik endüstriyel çaplı kömür yığınları üzerinde deneysel çalışmalar yapılmaktadır. Bu çalışmalar yardımı ile, özellikle stok sahalarındaki kömürlerin kendiliğinden yanmaya karşı davranışlarının belirlenmesi, olay üzerinde etkin olan parametrelerin incelenmesi, güvenilir depolama şartlarının ve süresinin bulunması mümkün olmaktadır.

Stok halindeki kömürlerin kendiliğinden yanması olayında birçok araştırmacı tarafından çalışmalar yapılmıştır. Literatürde bu konu ile yapılan çalışmalara ait bilgiler aşağıda kronolojik olarak verilmiştir.

Matematiksel modelleme ile ilgili olarak yapılan ilk çalışma Vandoornum'un (1954) tek boyutlu olarak yaptığı çalışmadır. Bu modelde yalnızca enerji dengesi dikkate alınmıştır. Isı transferinin sadece iletimle olduğu ve kömür yatağında sabit bir oksijen konsantrasyonunun var olduğu kabul edilmiştir. Oksidasyon oranı tam olarak bilinmemektedir. Reaksiyon hızının

zaman ve sıcaklığın fonksiyonu olarak değişeceği kabul edilmiş ve belli şartlarda kömürde oluşan ortalama sıcaklıklar analitik olarak hesaplanmıştır.

Van Doornum (1970) ile Chauvin ve arkadaşları da (1985), aynı şekilde laboratuvar şartlarında tasarlanan farklı büyüklüklerde ve farklı geometrik şekillerdeki silolarda yaptıkları deneylerde, sıcaklık ve oksijen konsantrasyon değerlerini ölçerek kendiliğinden yanma olayını incelemişlerdir.

Sondreal ve Ellman (1974), Vandoornum'un modelini geliştirmişler ve Sonlu Elemanlar Metodunu (SEM) kullanmışlardır. Bu model ile kendiliğinden yanma sonucu oluşan en yüksek sıcaklık hesaplanmıştır. Ayrıca, bu matematiksel model ile kömür yığını içerisindeki sıcaklık profillerinin hesaplanabileceğini ve ayrıca oksijen tüketimi ve transferinin konveksiyon ile meydana geldiği gösterilmiştir.

Baum ve arkadaşları (1978) yaptıkları çalışmada, kömürde reaksiyon neticesi açığa çıkan ısının yalnızca iletimle ortamdan uzaklaştığı kabul edilmiştir. Bu çalışma Van Doornum'un (1954) çalışmasına benzer bir çalışmadır. Isının ortamdan uzaklaştığı gibi belli kabuller altında elde edilen enerji dengesi eşitliği, farklı geometrik şekillere göre matematiksel olarak bulunmuştur. Çözümlerin kararlı sonuç verdiği noktalardaki kritik ortam sıcaklıkları, kinetik parametrelerin fonksiyonu olarak incelenmiştir.

Nordon'un 1979 yılında geliştirdiği model, ısı ve kütle transferi olaylarının ilk defa kapsamlı olarak incelendiği bir çalışmadır. Bu model, tek boyutlu ve zamana bağlı olarak kömürdeki oksijen, nem ve enerjinin korunum denklemleri, iletim, taşınım ve difüzyon olayları ile birlikte çözümlenmiştir. Çözümde, kömürde oluşan sıcaklıklar ve oksijen değişimleri, zamanın bir fonksiyonu olarak verilmektedir. Kömürde zamanla sıcaklık artışları, seçilen hava hızlarına bağlı olarak ( $0,5 \cdot 10^{-4} - 1 \cdot 10^{-4}$  m/sn), 17 ile 87°C arasında olmaktadır. Bu sıcaklıklar, kömürdeki üretilen ısı ve kaybına, gaz hızına, kömür reaktivitesine ve yığının geometrisine bağlı olarak değişmektedir. Bu çalışmada kullanılan kinetik parametreler, kok kömürüne ait olduğu için, elde edilen sonuçların linyit ve taşkömürlere uygulanabilmesi mümkün değildir. Yine bu çalışmada kritik değer olarak, en optimum sıcaklık ve stoklama süreleri hesaplanmaya çalışılmıştır. Stoklanan kömürün büyük hacimlerde olması ve oluşan reaksiyonların çok uzun



sürede meydana gelmesi nedeniyle Nordon (1979), reaksiyonların deneysel olarak tanımlanmasının zorluğuna dikkat çekmiştir.

Stott (1980), büyük ölçekli laboratuvar çalışmaları yapmıştır. 0,6 m çapında 5 m yüksekliğinde silindirik bir kanal içinde, 1 ton civarındaki kömür örneği üzerinde çalışarak ölçümler yapmıştır. Sıcaklık, oksijen ve reaksiyon ürünlerini ölçmüştür. Silindirik yatak içinde en yüksek 45°C'lik bir sıcaklık artışı elde etmiştir. Kendiliğinden yanma olayının doğrudan kömür cinsine bağlı olmasıyla birlikte, oksidasyon sırasında açığa çıkan ısı ile çevre sıcaklığının önemli bir faktör olduğunu belirterek çalışmasını sonuçlandırmıştır. Diğer bir söylemle, laboratuvar ölçekli deney setinde kullanılan kendiliğinden yanma koşullarına ulaşabilmek için, üretilen ısının kaybolan ısıdan çok fazla olması gerekmektedir. Bunun için de kömür yatağı boyutlarını büyütmeyi ya da iyi bir izolasyon yapmayı önermiştir.

Edwards (1983), Nordon'un (1979) benzer bir model uygulamıştır. Yapılan bu çalışma, aslında birbirinden ayrılan üç farklı modelden oluşmuştur. Bu farklılıklar esas alınış sırasıyla; kömür içindeki gaz hızının sabit, ısıl genişleme etkisiyle ve gözenekliliğe bağlı geçirgenliğin etkisiyle oluşacağı kabullerine dayanır. İkinci ve üçüncü modelde oksijen tüketimi nedeniyle meydana gelen gaz basıncındaki düşüşler, ideal gaz denkleğine göre bulunmuştur. Ancak reaksiyon ürünlerinin açığa çıkması ile gaz basıncında oluşabilecek artışlar önemsenmemiştir.

Chauvin ve arkadaşları (1985), oksijenin gaz ve katı fazındaki enerjinin ve toplam kütlelenin korunumu eşitliklerini içeren bir model geliştirmiştir. Burada SEM kullanılmış olup, ilk önce zamanın fonksiyonu olarak tek boyutlu çözümler bulunmuştur. Sonuç olarak kömürün ilk sıcaklığı ile gaz hızlarının yüksek ısıl artışlarının oluşumunda, önemli kritik değerler olduğu görülmüştür. Düşük hava hızı değerlerinde oksijenin az olması, yüksek hava hızı değerlerinde ise soğuma etkisi nedeniyle, zamanla sıcaklık sabit değerlere doğru ulaşmıştır. Arada oluşan hava hızlarında yüksek ısı artışları oluşmuştur. Ayrıca bulunan bu teorik model, deneysel olarak bir silo modeline göre iki boyutlu şekilde uyarlanmaya çalışılmıştır. Elde edilen deney ve teorik model sonuçları

arasında, belirli şartlar dahilinde oldukça benzer yönler olduğu bulunmuştur. Fakat yapılan deneylerde nemli kömürler için büyük ısı artışları olmaz iken teorik model farklı sonuçlar göstermiştir. Yapılan çalışmada, bu olayın nedeninin yalnızca kinetik parametreler etkisiyle olduğunun söylenmesine rağmen, modelde buharlaşma etkisinin dikkate alınmadığı da görülmüştür. Bu etki önemli bir etkendir.

Evseev ve Voroshilov'un (1986) yaptıkları araştırmada, nemin etkileri incelenmeye çalışılmıştır. Genel olarak nemin etkilerini araştıran model çalışmaları sayısı oldukça azdır. Bu çalışmada bulunan model ile kendiliğinden yanma olayı üzerindeki buharlaşma etkileri dikkate alınmıştır. Kübik bir sistem seçilerek sistemin dış yüzeyinden ısı taşınım ve buharlaşma ile ısı kayıplarının olduğu ve sistemin düzgün dağılım bir sıcaklığı olduğu kabulleri yapılmıştır. Modelin çözümü sonucunda, ısı artışlarının olduğu süreler gaz hızına bağlı olarak incelenmiştir.

Morita ve arkadaşlarının (1986) yaptığı model çalışmada, katı fazdaki enerjinin korunumu ile gaz ve katı fazında oksijenin korunumu denklemleri kapsanmıştır. SEM kullanılarak yapılan çözümler, gerçek boyuttaki bir silo üzerinde elde edilen deneysel verilerle karşılaştırılmıştır.

Brooks ve Glasser (1986), sürekli bir zaman içerisinde geçerli olan üç ayrı çalışma yapmışlardır. Tek boyutlu araştırmada, nemin etkilerini ihmal ederek basit ve analitik çözümler yer almıştır. Bu çalışmada esas amaç, kömür yığnında oluşan sıcaklığın, zamanın fonksiyonu olan parametrelere göre, güvenilir depolama şartlarının araştırılmasıdır. Sonuçta ise, belirli şartlardaki kuru kömür yığnlarını, güvenli ve güvensiz olarak sınıflandırmaktadır. Bu model oluşturulurken yapılan kabullerde, kömür yığnının her tarafı izole edilmiş şekilde her iki ucu da açık ve dik şekilde bir tüp gibi düşünülmüştür. Yığın merkezine doğru olan akım, doğal ısı taşınım ve rüzgar basıncının etkisindedir. Moleküler difüzyon ihmal edilmiş, yığından radyasyon ve akım yoluyla ısı kayıpları olduğu kabul edilmiştir. Modelde tane boyutu fiziksel olarak önemli bir değerdedir. Bir kömür yığnının güvenli olup olmadığı bilinmek isteniyorsa, oksijen limitli yığnlarda ince taneli kömür fazla olursa

hem boşluklar azalacak hem de oksijen tüketim miktarı artacaktır. Dolayısıyla yığının güvenliliği artmış olacaktır. Isı transferinin sınırlı olması gerekli olan yığınlarda ise, küçük boyutlu kömür tanelerinin yığından uzaklaştırılması ile reaksiyon oranı düşürülerek yığının güvenliliği sağlanacaktır (Ünver ve Özözen, 1998). Diğer bir deyişle, modelin çözümlene sonucunda yığında oluşan en yüksek sıcaklığın kömür tane boyutuna bağlı olarak değişimleri araştırılmıştır.

Daha sonraları Stott ve arkadaşları (1987) ve Stott ile Chen (1992), 2 m yüksekliğinde ve 0,3 m çapında silindirik bir kanal tasarlayarak yeni bir çalışma yapmıştır. Bu kanalda radyal yöndeki ısı kayıpları bilgisayar kontrollü ısıtıcılar, kullanılarak en az seviyeye düşürülmüştür. Düşeyde sabitlenen bu kanalda, 707 ml/dak'lık hava akışına tabii bırakılan kömürde zamana bağlı sıcaklık değerleri tespit edilmiştir. Bu deney düzeneğinde, yedi farklı kömür test edilerek kendiliğinden yanmaya yatkınlıkları araştırılmıştır.

Young ve Willis'in (1987) geliştirdiği modelde, kapalı bir yığın içerisinde oluşturulan sıcak noktaların etkileri araştırılmıştır. İki boyutlu olarak geliştirilen bu model, doğal ısıl taşınım ve ısı iletimi ile bunların, bir kömür yığını içerisine nasıl oluştuğunu incelemiştir. Ayrıca deneysel olarak, gözenekli bir ortamda doğrusal bir ısı kaynağı, ısı oluşumu ve ısının iletimi detaylı olarak incelenmiştir. Bu deneysel çalışmada, kömür yığını için sıcaklık profilleri de oluşturulmuştur. Model çalışmada, kömürün reaktivitesinin önemli bir parametre oluşturduğu görülmüştür. Yapılan bu modelin önemli bir sonucu da, yığın içine giren hava hacmi hesabının da mümkün olduğunun ortaya çıkmasıdır.

Brooks, Glasser ve Bradshaw'in (1990) 1988 yılında yaptığı diğer bir çalışmada, kömür yığınının ortalama olarak bir sıcaklığa sahip olduğu kabul edilmiştir. Bu sıcaklık değerine göre, birinci olarak reaksiyon hızı ve yığın içerisine doğal taşınım ile giren havanın debisi hesaplanmaktadır. Yığında doğal taşınım ve iletim, enerjinin korunumu denklemi ile çözülmüştür. Sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak yapılan çözümlenmede, kömür yığını içerisinde oluşan sıcaklık dağılımları iki boyutlu olarak incelenmiştir.

Brooks, Svanas ve Glasser'in (1988) yaptığı bu çalışmada, daha önceki modeline göre tek boyutlu yatağın sakıncaları söz konusudur. Bu modelde

kömür ile gaz reaktifleri arasında olan reaksiyonlar, yığın içerisindeki ısı transferi ve gaz reaktiflerinin yığın içine olan transferini baca etkisi ile açıklamıştır. Bu araştırmada da kömür yığınları güvenli, güvensiz ve şartlı güvenli diye sınıflandırılmıştır. Kömürün güvenli stoklanmasında tane boyutu, yığın gözenekliliği ve reaksiyon hız oranı en önemli parametreler olmuştur. Bu özellikten dolayı, gerçekçi çözümler için üç boyutlu model tasarlamışlardır. Yapılan modelde, stok boyutu ile ısı kaybı arasındaki ilişkiler araştırılmış ve tane çapı kritik parametre olarak incelenmiştir.

Schmal'in 1989 yılında yaptığı çalışma, kömür yığınınındaki ısı ve kütle transferi reaksiyonlarını oldukça kapsamlı olarak dikkate alan bir modeldir. Bu çalışmada tek boyutlu olarak ifade edilen enerjinin ve oksijenin korunumu denklemleri, SEM kullanılarak çözülmüştür. Zamanın fonksiyonu olarak verilen bu eşitliklerde iletim, konveksiyon ve difüzyon olayları birlikte dikkate alınmıştır. Kuru ve nem içeren kömürlere uygulamalar yapılmıştır. Buharlaşma hızı, yığın içerisindeki gaz çıkış hızı, sıcaklık ve yatak boyunca oluşan sıcaklık değerine göre farklılıklar arz etmektedir. Çözümlerde yığın gözenekliliği, dış ortam sıcaklığı ve nemin etkisinin kendiliğinden yanmada çok önemli oldukları saptanmıştır. Kok ve arkadaşları (1989), 2500 ton'luk çok büyük çaplı 3 adet kömür stoğu üzerinde çalışmıştır. Kendiliğinden yanmanın davranışını ve meydana gelen kayıpları araştırmıştır.

Edwards (1990), geometrisi küp şeklinde olan bir hacim içine 15 ton kömür yerleştirmiş ve kömürde zamanla meydana gelen değişiklikleri ölçmüştür. Bu deney setinde kömür numuneleri 30 l/dak'lık bir hava akışına tabii tutulmuşlardır. Ayrıca kömür yüzeyinden 15 cm aşağıya küçük boyutlu bir ısıtıcı levha yerleştirilerek oksidasyon hızlandırılmıştır. Büyük ölçekli bu sette kendiliğinden yanmaya yatkınlık araştırılmıştır.

Stok halindeki kömürlerin kendiliğinden yanması olayında bir çok araştırmacı tarafından model çalışmaları yapılmıştır. Yapılan bu önemli model araştırmalarında henüz kendiliğinden yanma olayında etkin olan parametrelerin hepsini kapsayan bir model geliştirilememiştir. Kendiliğinden yanma, hem fiziksel hem de kimyasal açıdan karmaşık bir yapı oluşturduğu için yapılan

modellerin basit ve gerçek değerlere yakın olabilmesi için düşük sıcaklıklarda, çok basit bir veya iki boyutlu modeller geliştirilmiştir. Yapılan uygulamalı çalışmaların sonuçları ile modellerden geliştirilen hesaplamalar kıyaslandığında, özellikle 50°C'nin üzerindeki sıcaklıklarda ve nem değerinin dikkate alındığı durumlarda, modellerin iyi sonuç vereceği görülmüştür (Ünver ve Özözen, 1998).

Fierro ve arkadaşları (1999b), endüstriyel çaplı stoklar üzerinde çalışmışlardır. Bu amaçla, İspanya'daki Endesa kömürlerinden 3 ayrı stokta 2000-3000 ton civarındaki kömürlerde deneysel ve laboratuvar araştırmaları yapmışlardır. 1. yığın periyodik aralıklarla sıkıştırılan bir yığındır. 2.'si yüksek yığın gözenekliliğine ve 3. yığın ise düşük şev açısına göre tasarlanmıştır. Ayrıca oksidasyon durumu, artan sıcaklık değerleri ve konumları, kızılötesi termografi ile takip edilmiştir. Deneyler sonunda, kendiliğinden ısınmaya bağlı sıcaklık değişimlerini hesaplamış ve yeni bir kalorifik kayıp katsayısı geliştirmiştir. Ayrıca kömür stoğunun kendiliğinden ısınma karakteri, termal kamera ile takip edilmiştir. Yine bu çalışmada ilginç değerlere ulaşılmıştır. Deneysel ölçümlerde kullanılan stoktaki sıcaklığın gözlemlenmesi ve ısı kayıplarının tahmin edilebilmesi tekniklerinin, termal kamera yöntemiyle daha kolay yapılabileceği ve deneysel tekniklere gerek kalmadığını ispatlamıştır. Yine termal kamera ile ısınan noktaların kolayca tahmin edilebileceğini göstermişlerdir.

Fierro ve arkadaşlarının 1999a ve 2001'de yaptıkları detaylı gerçek ölçüm araştırmaları, bu konuda araştırma yapan araştırmacılara katkı sağlamıştır. Bu amaçla İspanya'daki Mezcla tipi kömürlerden 5 adet 2000-3000 ton civarında yığın oluşturmuşlardır. 1. yığın normal olarak, 2. yığında periyodik sıkıştırmalar yapılmış, 3. yığın düşük eğim açısı ile oluşturulmuş, 4. yığın yapay rüzgar bariyerleri ile rüzgardan korunmuş ve 5. yığında kül - su karışımı bir çamur ile kaplanmıştır. Burada ilginç bir çalışma daha yapılmıştır. Rüzgar basıncının etkisini azaltmak için rüzgar tüneli deneyleri yapılmıştır. Bu deney sonuçlarına göre yığın en uygun rüzgar bariyeri ile çevrilmiştir. 5. yığın üzeri kireçtaşı, kil, kömür tozu, tuğla tozu ve alçı taşı karışımı bir malzeme ile kaplanmıştır. Bütün bu yığınların sıcaklığını kaydetmek ve gaz örneklerini toplamak için termoçiftli ve örnek alıcılı 0,6 m, 1,5 m ve 3 m boyunda paslanmaz çelikten sondalar

yığının belirli bölgelerine yerleştirilmiştir. Bu sondalar yardımıyla kendiliğinden yanma işleminin başlangıç ve gelişimi saptanmıştır. 5. yığının kül-su karışımı çamur ile kaplanması neticesinde, yığının kendiliğinden yanmayı önlemede çok etkili olduğu, ayrıca rüzgar bariyerli yığının da etkili olduğu deney sonuçlarından anlaşılmıştır. Bu deney sonuçlarını bir matematiksel modelle de desteklemişlerdir.



#### 4. KÖMÜR STOKLARINDA KENDİLİĞİNDEN YANMA OLAYININ İNCELENMESİ

Kendiliğinden yanma olayı, bir çok reaksiyonlar sonucu üretilen ısıнын, çeşitli faktörlere bağlı olarak çevreye olan kayıp ısıdan fazla olması durumunda, kömür bünyesinde meydana gelen sıcaklık artışının bir sonucudur. Kömürlerin kendiliğinden yanmaya olan yatkınlıklarının biliniyor olması, olayın oluşumunun önceden tespiti ve buna göre gerekli önlemlerin alınabilmesi açısından pratik olarak büyük önem taşımaktadır.

Garp Linyitleri İşletmesi (GLİ) stoklarında üretim fazlası kömür, stok sahalarında zorunlu olarak bekletilmektedir. Kömürlerin stok sahalarında uzun süre beklemesi durumunda, stok yangınları meydana gelmektedir. GLİ'nin son on yıllık stoklarda, yangın sonucu oluşan tahmini kömür kayıpları yaklaşık 500.000 ile 1.000.000 tondur. Bu nedenle, stokların kendiliğinden tutuşmasına sebebiyet vermeden, gerekli önlemlerin alınması çok önemlidir. Şimdiye kadar Tunçbilek ve diğer ülke kömürlerimiz üzerinde laboratuvar ölçekli bir çok çalışma yapılmasına rağmen, büyük boyutlu bu stoklar üzerinde çok ciddi çalışmalar yapılmamıştır. Yapılan laboratuvar ölçekli çalışmalarda ise gram mertebelerinde kömür numuneleri üzerinde yapılmakta ve sınırlı sayıdaki parametrelerin olay üzerindeki etkisi, yalnızca deney şartlarında geçerli olmak üzere incelenebilmektedir. Bu nedenle, laboratuvar ölçekli deneysel çalışmalar ile, kömürlerin kendiliğinden yanması olayının bir bütün olarak incelenmesinin çok güç olduğu gibi, elde edilen sonuçların da pratiğe uyarlanması oldukça zor olmaktadır. Böylece, kendiliğinden yanma olayı üzerinde etkin olan parametrelerin büyük çoğunluğunu veya tümünü kapsayan, özellikle kömürün kendiliğinden yanması esnasındaki genel davranışının belirlenmesi amacına yönelik, endüstriyel çaplı çalışmaların önemi büyüktür. Ancak bu tür çalışmaların çok uzun süre gerektirmesi ve pahalı bir yöntem olması nedeniyle yapılan çalışmaların sayısı oldukça azdır. Bu çalışma, yukarıda sözü edilen nedenlerden dolayı, stok sahalarındaki kömürün doğal hava şartlarında bekleme sonucu oluşan davranışları incelenmiştir.



#### **4.1. Garp Linyitleri İşletmesi (GLİ)**

Garp Linyitleri İşletmesi (GLİ), 1940 yılında Etibank'a bağlı olarak kurulmuş daha sonra 1957 yılında kurulan Türkiye Kömür İşletmeleri Kurumu'na (TKİ) devredilmiştir.

##### **4.1.1. İşletme Müdürlüğü'nün yeri, kuruluş amacı ve tarihçesi**

İlk zamanlarda Balıkesir'de olan işletme merkezi, 2. Dünya savaşı sırasında Tavşanlı'ya taşınmıştır. Müdürlük, Tunçbilek bölgesinde faaliyetini sürdürmektedir. Tunçbilek bölgesi, Tavşanlı'ya 13 km, Kütahya'ya ise 63 km uzaklıktadır.

Türkiye'nin önemli linyit rezervlerine sahip olan GLİ, üretime başladığı 1940 yılında 149.256 ton/yıl olan satılabilir linyit üretimi, 1960 yılında 1.698.415 ton, 1980'de 8.746.692 ton, 1985'de 11.172.673 ton ve Seyitömer bölgesi ayrıldığı zaman 1992'de 5.873.000 ton, 1995'de 5.500.000 ton/yıl üretim ve 2000'de 5.750.000 ton düzeyine ulaşmıştır. Üretilen kömürler, Tunçbilek'te kurulu 429 MW gücündeki termik santralin ve aynı zamanda birçok ilimizin kömür ihtiyacını sağlamaktadır.

##### **4.1.2. Tunçbilek havzasının jeolojisi**

Tunçbilek havzasının jeolojisi; lokasyon, stratigrafi ve yapısal jeoloji olmak üzere üç ana başlık altında incelenmiştir.



#### 4.1.2.1. Konum

Tunçbilek kömür havzası, Kütahya ili sınırları içinde, Tavşanlı ilçesinin 10 km kuzeybatısında yer almaktadır. Karasal iklim hakimdir. Yükselteler 650 – 1050 m civarındadır (Şekil 4.1).



Şekil 4.1. Garp Linyitleri İşletmesi yer bulduru haritası

#### 4.1.2.2. Stratigrafi

Havzadaki sedimanlar, karasal Neojen ve Kuaterner oluşumludur. Havzada en yaşlı birim olan Paleozoik zamanlı bu birimler üzerine, Mesozoik yaşlı serpantinleşmiş ultrabazik kayalar gelir. Tüm bu birimler üzerine diskordan olarak gelen Neojen, Miosen (Tunçbilek serisi) ve Pliosen ile temsil edilmektedir. Miosen serisi, temelde kumtaşı ve onun üstündeki marndan oluşmuştur. Marn birimi konkordan olarak gelmektedir.

Marn, havzanın güneyinde özellikle çok geniş bir alana yayılmaktadır. Genellikle marn; killi marn, siltli marn, silttaşı, miltaşı araldanmasından oluşmaktadır. Rengi kahvems, krem - grimsi, krem renklidir. Ayrıca belirli tabakalanma gösterir (Acar ve Divan, 1976). Havzaya ait stamp Şekil 4.2'de verilmiştir.

Derinlik (m)	Tabaka kalınlığı (m)	Tabaka Cinsi	
8.00	8.00	Toprak	---
22.00	14.00	Silisli kalker	---
26.50	4.50	Yeşil kumtaşı	■
27.00	0.50	Sileks	■
29.00	2.00	Yeşil kumtaşı	■
34.25	5.25	Silisli Kalker	---
37.50	3.25	Yeşil ve Gri kumtaşı	■
85.50	48.00	Yer yer Sileks ve kumtaşı	■
86.75	1.25	Sileks	■
125.75	39.00	Sileks Marn	■
30.25	176.50	Gri Marn	---
305.30	3.25	Killi Gri Marn	---
315.20	9.50	Gri Marn	---
331.90	16.90	Kiltaşı K.Rengi	.. -- .-. -
336.50	4.60	Kömür	■
336.65	0.15	Kiltaşı	---
337.00	0.35	Kömür	■
337.75	0.75	Kiltaşı	---
338.65	0.90	Kömür	■
339.30	0.65	Kiltaşı	---
340.85	1.55	Kömür	■
346.00	5.15	Kiltaşı	---

Şekil 4.2. Havzaya ait stamp

Şekil 4.2'deki Tunçbilek havzasının stampı incelendiğinde, kömür arakesmelerinde kıltaşı bulunmaktadır. Kömür damarlarının üst serilerinde ise marna rastlanmaktadır. Bu bölgedeki marn serilerinin oldukça büyük miktarda olduğu görülmektedir.

#### **4.1.2.3. Yapısal jeoloji**

Neojende yapısal olarak önemli olabilecek, fay ve kıvrımlara rastlanılmamaktadır. Genel olarak havzada eğim atımlı normal faylar gelişmiştir. Neojen havzasında durgun olan tektonik hareket, marn biriminin çökmesinden sonra Miosen sonlarına doğru hareketlenme göstermiştir. Bu hareketlenme, volkanik faaliyetler nedeniyle genişlemektedir (Acar ve Divan, 1976).

### **4.2. Tunçbilek Bölgesi Kömür Üretim Yöntemleri**

Tunçbilek bölgesinde kömür üretimi, açıkocak ve yeraltı üretimi metodları ile yapılmaktadır. Açıkocak da çeşitli panolarda üretim yapılmaktadır. Yeraltı üretimi ise Tunçbilek ve Ömerler yeraltı ocaklarından yapılmaktadır.

#### **4.2.1. Açıkocak Üretimi**

Tunçbilek bölgesi açıkocaklarındaki çeşitli panolarda, dekapaj çalışması yapılmaktadır. Açıkocak üretim sistemi olarak, ekskavatör - kamyon yöntemi uygulanmaktadır. 1970'den itibaren uygulanmakta olan yeni dekapaj çalışma sisteminde, kömür üzerindeki örtü tabakası yaklaşık 20 - 25 m'ye kadar mevcut sistem ile alınmakta, geri kalan kısım ise dragline ile yapılmaktadır.

Şu anda açık ocakta örtü tabakasının kalınlığı 100 - 150 m olup genellikle orta dayanımdaki marndan oluşmuştur. Örtü tabakasındaki delik delme

işlemleri, 6 inç (15 cm) ve 9 inçlik (22,5 cm) delik makineleri ile yapılmakta ve patlayıcı olarak AN - FO kullanılmaktadır (Patır ve ark., 1989).

Basamak yükseklikleri 12 m ve 15 m olup, 10 ve 20 yd<sup>3</sup>'lük elektrikli ekskavatörlerle bu basamaklarda kazı yapılmaktadır. Örtü tabakası, 85 ve 170 ton'luk kamyonlarla yaklaşık 1 - 2 km mesafedeki dekapaj harmanlarına taşınmaktadır.

Örtü tabakası alınmış sahada, dragline ile dilimler halinde kazı yapılmaktadır. Dilim genişliği yaklaşık olarak 60 m'dir ve dilim uzunluğu ise 1 - 2 km arasında değişmektedir. Kömür üretimi başlıca iki panoda yapılmaktadır. Kömür kalınlığı bu panolarda 8-9 m'dir. Açık ocaklardan üretilen kömürün ortalama % 52'si kribraj tesislerine, % 30'u kömür hazırlama tesisine, % 18'i ise termik santrale verilmektedir (Atakuru ve ark., 1994). Çizelge 4.1'de, 1996-2003 yılları arası yapılan dekapaj miktarları ve bu dekapaj miktarına karşılık kömür üretimleri verilmiştir (GLİ faaliyet raporu, 2003).

Çizelge 4.1. Dekapaj ve kömür üretim miktarları (GLİ faaliyet raporu, 2003).

Üretim Yılları	Dekapaj (m <sup>3</sup> )	Kömür (ton)
1996	19.510.000	5.487.000
1997	19.175.000	4.812.000
1998	20.218.000	5.060.000
1999	25.640.000	3.696.000
2000	25.036.000	5.170.000
2001	22.270.000	4.811.000
2002	25.043.000	4.648.000
2003(3 ay fiili)	1.642.000	952.000

#### 4.2.2. Yeraltı üretimi

Tunçbilek'te iki bölgede yeraltı üretimi yapılmaktadır. Bunlar, Tunçbilek ve Ömerler yeraltı ocaklarıdır. Her iki yeraltı ocağında da dönümlü uzunayak, ve göçertme sistemi ile çalışılmaktadır. Damarın tavan ve taban taşına komşu ikişer metrelik dilimleri, tavan ve taban ayaklar ile üretilmekte, iki ayak arasında kalan kısmı ise taban ayak arkasından göçertilerek alınmaktadır. Ömerler ocağında, ayaklarda çift tamburlu kesici - yükleyici sistemi ile kömür kazısı yapılmaktadır. Klasik ayaklarda tahkimat malzemesi olarak sürtünmeli demir direklerle hidrolik direkler ve mafsalı çelik sarmalar kullanılmakta ve bu tahkimat sistemi ağaç direk, sarma ve kamalarla takviye edilmektedir (Çakır ve ark., 1985). Bu iki ocaktan alınan kömür üretimleri Çizelge 4.2'de verilmiştir (GLİ faaliyet raporu, Mart 2003).

Çizelge 4.2. Yeraltı kömür üretim miktarları (GLİ faaliyet raporu, 2003).

Üretim Yılları	Miktar (ton)
1996	741.000
1997	789.000
1998	576.000
1999	734.000
2000	580.000
2001	704.000
2002	633.000
2003 (3 ay fiili)	72.000

### 4.3. Deney Sistemi ve Deneyin Yapılışı

Deneylerin yapıldığı kömür yığını, GLİ Tunçbilek İşletmesi'nin, kömür stok sahasında yer almaktadır. GLİ'nin ocaklarından üretilen kömürler, piyasaya satılmak için üç ürün şeklinde, Tunçbilek ve Ömerler kömür hazırlama tesislerinde zenginleştirilmektedir. Bunlar +50, 18-50 ve 0-18 olarak adlandırılan kömürlerdir. Deneyin yapıldığı kömürler 18-50 olarak adlandırılan 18 mm ile 50 mm arasındaki zenginleştirilmiş kömürlerdir. İşletmede üretim fazlası en çok kömür bu aralıkta olduğu için, çalışmalar bu kömürler üzerinde gerçekleştirilmiştir. İşletme, 0-18 ürün için stok yapmamakta, mevcut siloları dolduğu zaman fazlasını enerji üretim tesisine beslemektedir. +50 boyutunda fazla miktarda iri ürün alınmadığı için, bu boyut işletmede sorun oluşturmamaktadır. Bu çalışma için oluşturulan 18-50 kömür yığınının uzunluğu 10 m, eni 5 m, yüksekliği 3 m olup, yaklaşık 120 ton kömür içermektedir. Üçgen prizma şeklinde oluşturulan yığının genel görünüşü Şekil 4.3, 4.4, 4.5, 4.6, 4.7'de verilmektedir.



Şekil 4.3. Oluşturulan yığının batı tarafından genel görünüşü



Şekil 4.4. Oluşturulan yığının güney tarafından görünüşü



Şekil 4.5. Oluşturulan yığının yakından görünüşü





Şekil 4.6. Oluşturulan yığının doğu yönünden görünüşü



Şekil 4.7. Oluşturulan yığına sensörler yerleştirilirken

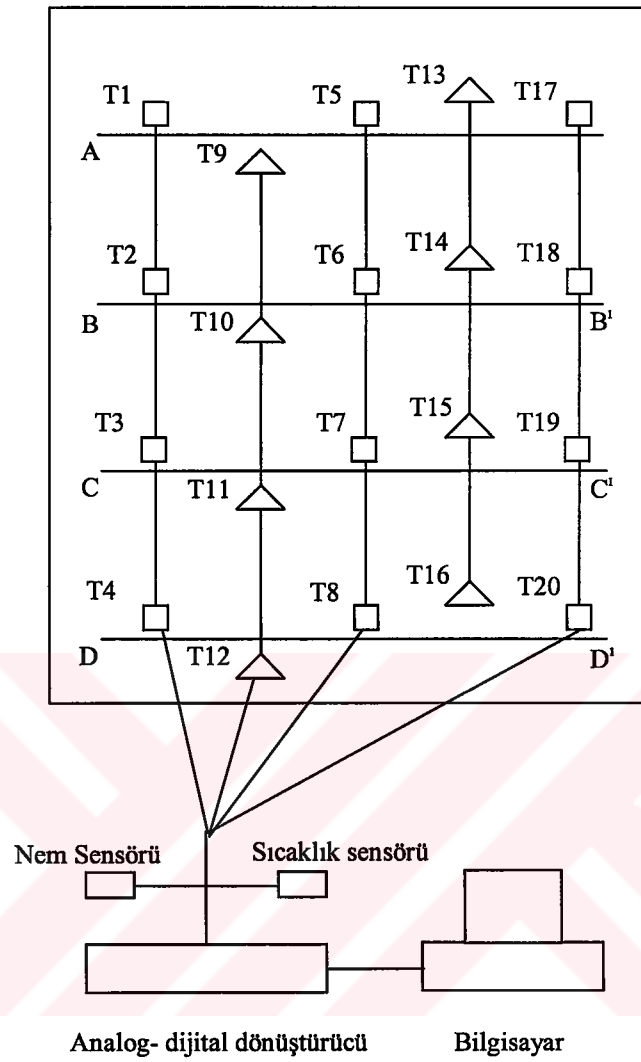


Yığının içerisinde çeşitli noktalara, sıcaklık farklarını hassas şekilde algılayabilecek sıcaklık sensörleri (Pt100) yerleştirilmiştir. Bu sensörlerin yerleştirilmesi için, 16 adet 1,5 m, 4 adet 2,5 m uzunluğunda paslanmaz çelikten sondalar imal edilmiştir. Bu sondaların uç kısmı, Pt100'ün sıcaklığı kolay algılayabilmesi amacıyla delikli olarak yapılmıştır. Pt100 borunun içinden geçirilerek, uç kısmına dikkatlice monte edilmiştir. Borunun arka kısmının kenarından Pt100'ün kablosu çıkarılmıştır. Arka kısmı, açılabilmesi için somunlu olarak yapılmıştır. Somunlu olarak yapılmasının nedeni, kendiliğinden yanmanın oluşması durumunda somunun çözülerek, CO gazı ölçümünün yapılabilmesidir. Sondaların genel görünüşü Şekil 4.8'de verilmektedir.

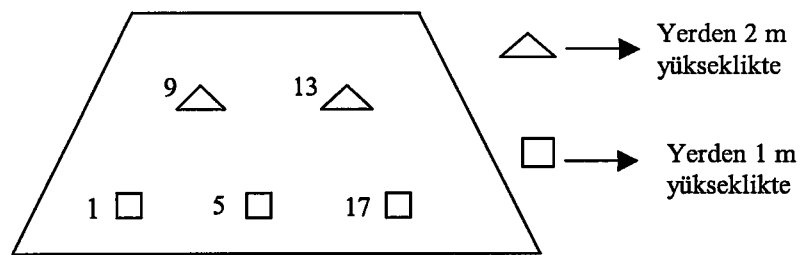


Şekil 4.8. Yığına yerleştirmek üzere hazırlanmış olan sondalar.

Kömür yığını içerisinde yerleştirilen 20 adet Pt100'ün yerleşimi şematik olarak Şekil 4.9'da verilmektedir.



a)



b)

Şekil 4.9. Yığındaki Pt100'lerin şematik gösterimi, a) Plan, b) AA' kesit

Yığına yerleştirilen 20 adet Pt100'den çıkan kablolar, önce dijital çevirici panoya, oradan da bilgisayara bağlanmıştır. Okumalar bilgisayar aracılığıyla otomatik olarak yapılmıştır. Bu amaçla Delphi dilinde özel bir program yazılarak kullanılmıştır.

Deneysel çalışmalar için iki adet yığın hazırlanmıştır. 1. yığın 2001 Mayıs sonunda hazırlanarak çalışmalara başlanmış ve Ağustos sonunda bitirilmiştir. Hazırlanan 2. yığındaki çalışmalar 2002 Mayıs sonlarında başlanmış ve Eylül başlarında sona erdirilmiştir. Yığından belli dönemlerde numuneler alınarak, boyut analizi ve kısa kömür analizi uygulanmıştır. GLİ Tunçbilek işletmesi laboratuvarlarında yaptırılan bu analizler Çizelge 4.3 ve 4.4'de verilmektedir.

Çizelge 4.3. Deneysel çalışma için hazırlanan yığından çeşitli tarihlerde alınan numunelere ait kısa kömür analiz sonuçları

	Tarih	Rutubet (%)	Kül (%)	Kalori (kcal/kg)	Uçucu Madde (%)	Yanıcı Kükürt (%)
1. Yığın	30.05.2001	12,80	15,69	5124	37,10	1,57
	27.06.2001	13,10	16,17	4944	36,60	1,42
	25.07.2001	15,10	17,21	4591	36,10	1,51
	28.08.2001	12,30	16,91	4488	35,30	1,59
2. Yığın	25.05.2002	11,50	24,70	4758	38,50	1,65
	22.06.2002	7,50	27,03	4688	37,33	1,33
	20.07.2002	10,90	24,91	4651	37,22	1,63
	05.09.2002	11,20	23,60	4572	37,09	1,81

Çizelge 4.4. Deneysel çalışma için hazırlanan yığından çeşitli tarihlerde alınan numunelere ait tane boyut analiz sonuçları

	Tarih	Ebat mm (%)			
		18-50	10-18	5-10	0-5
1. Yığın	30.05.2001	92.3	3.5	2.8	1.4
	27.06.2001	72.1	5.2	13.7	9.0
	25.07.2001	60.9	12.5	18.5	8.1
	28.08.2001	52.1	19.1	21.3	7.5
2. Yığın	25.05.2002	91.2	4.6	1.3	2.9
	22.06.2002	67.4	18.1	9.3	5.2
	20.07.2002	59.4	21.2	12.1	7.3
	05.09.2002	45.2	26.4	15.6	12.8

Stoktaki kömürlerin kalori ve tane boyut değerleri Çizelge 4.3 ve 4.4'den görüldüğü üzere, deneyin başlangıcında 5124 ve 4758 kcal/kg iken, deney bittiğinde 4488 ve 4572 kcal/kg değerine düşmüştür. Yine Çizelge 4.4'den görüleceği üzere deney başlangıcında 18-50 arasındaki tane boyutuna sahip kömür miktarı % 92,3 ve % 91,2 iken, deney sonunda % 52,1 ve % 45,2 ye düşmüştür. Tane boyutunun küçülmesi, yüzey alanının artmasına ve oksijen ile daha fazla temas etmesine neden olacağından dolayı, kendiliğinden yanma olaylarının meydana gelmesi kaçınılmazdır. Uzun süreli stoktaki kömürlerin beklemesi sonucunda oluşan boyut ve kalori düşmeleri, işletmeyi ciddi ekonomik kayıplar ile karşı karşıya getirmektedir.

#### 4.4. Bilgisayarlı Ölçüm Sistemi

Bilgisayarlı ölçüm sisteminde, yığın içerisinde oluşan sıcaklıkların bilgisayar yardımıyla otomatik olarak ölçülmesi amaçlanmıştır.

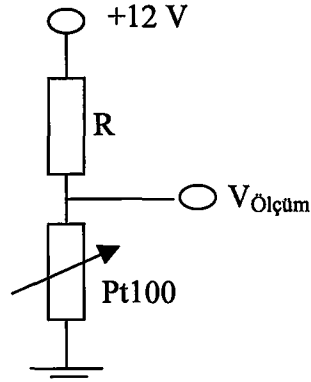
Bu amaçla, 20 adet sıcaklık sensörünün, kömür yığını içerisinde belirtilen noktalarda algıladığı sıcaklıkların elektrik sinyaline dönüştürülmesi, daha sonra bu elektriksel sinyallerin gerekli filtreleme ve yükseltme işlemleri yapıldıktan sonra, analog - dijital dönüştürme ünitesi kullanılarak, bilgisayar ortamına alınması ve bu bilgilerin istenen zaman aralıklarıyla bir veri tabanına kaydedilmesi sağlanmıştır.

Kömür yığınlarında kendiliğinden yanmanın en önemli işareti olan zaman-sıcaklık özelliklerinin tespitinde kullanılan bilgisayarlı ölçüm sistemi üç ana bölümden oluşmaktadır:

1. Dönüştürücü devreleri,
2. Analogdan dijitale dönüştürme ünitesi ve
3. Bilgisayar programı.

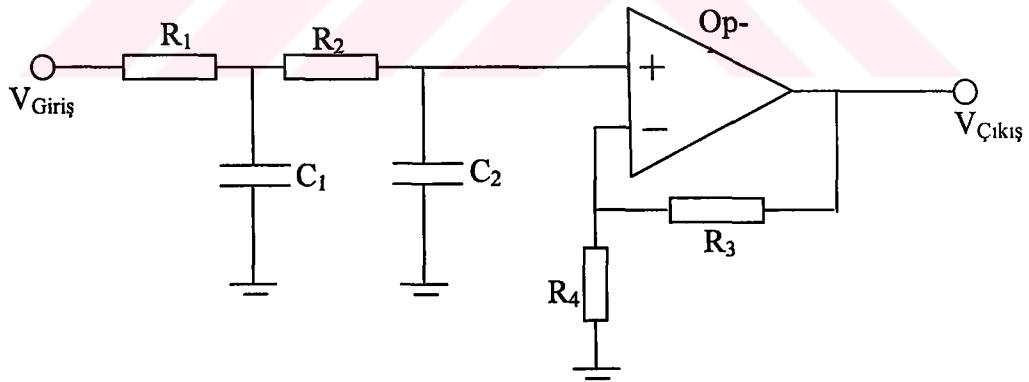
#### **4.4.1. Dönüştürücü devreleri**

Bu devrelere, kısaca sinyal uyumlandırma ve şartlandırma ünitesi de denilebilir. Ölçme işleminin temel elemanı, sıcaklık algılayıcıları olan Pt100 sensörlerdir. Bu sensörler, sıcaklıkla doğru orantılı olarak direnci artan elektronik elemanlar olup, aslında birer elektronik dirençtir. Normal dirençlerden farklı olarak, sıcaklık ile direnci doğrusal bir şekilde değişmektedir. Üzerindeki sıcaklık değişimine bağlı olarak direnci değiştiğinde, yine sıcaklıkla orantılı olarak uçlarındaki gerilim de değişmektedir. Bu devre, Şekil 4.10'da görülmektedir.



Şekil 4.10. Seri direnç devresi

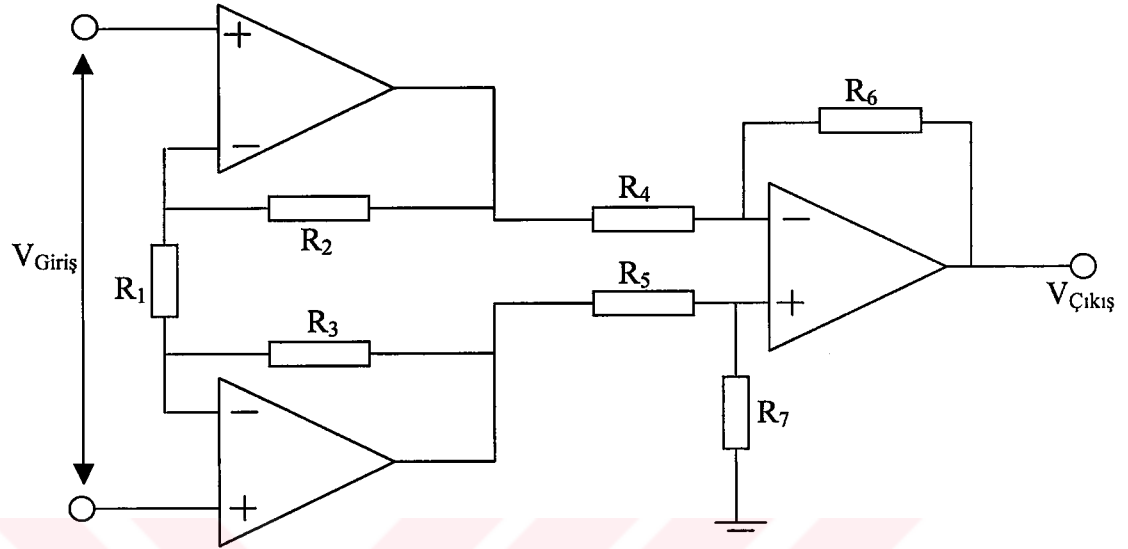
Bu gerilim değişimi, öncelikli olarak şebeke gürültüleri ve diğer elektriksel parazit kaynaklardan gelen etkilerin yok edilmesi amacıyla, alçak geçiren filtre (düşük frekansları geçirip, büyük frekansları geçirmeyen) devresinden geçirilmektedir. Bu tip bir devre Şekil 4.11’de görülmektedir.



Şekil 4.11. İkinci dereceden alçak geçiren filtre devresi

Bu işlemin ardından, gerilim değişiminin sınırları ayarlanmaktadır. Bu işlemin, analog – dijital dönüştürme ünitesinin giriş gerilim sınırları dikkate alınarak gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Çünkü gerilim değişimi bu sınırları aşarsa, söz konusu ünitenin bozulmasına yol açar ve tam aksine, değişim çok küçük sınırlarda kalırsa da ölçüm hassasiyeti düşer. Bu sınırlar arasında

kalabilmek için diferansiyel amplifikatörler kullanılmaktadır. Bu devrenin prensip şeması Şekil 4.12’de verilmiştir.



Şekil 4.12. Diferansiyel amplifikatör

#### 4.4.2. Analog-Dijital dönüştürme ünitesi

Sıcaklık bilgisini içeren elektriksel sinyal, filtrelerden geçirilip uyumlandırıldıktan sonra, analog – dijital dönüştürme ünitesine ulaşmaktadır. Bu ünite; analog çoğullama devreleri, ADC devresi ve bilgisayara bağlantı için arabirim devrelerinden oluşmaktadır. Bu projede kullanılan ünite aşağıdaki özelliklere sahiptir.

- 12 bit çözünürlüklü analog-dijital dönüşüm yapabilme,
- 100 mikro saniye dönüşüm süresi,
- 8 kanal analog giriş,

- d) 5 bit dijital çıkış,
- e) 3 bit digital giriş ve
- f) Printer portu ile iletişim.

Bu ünite, Maxim firmasının MAX186 seri ADC entegresi kullanılmıştır. Ayrıca dijital giriş çıkış işlemlerinde 74HC373 Latch Buffer entegresi kullanılmaktadır. Çok basit bir yapıya sahip olan bu ünite ile yazıcı girişi yardımıyla haberleşilmektedir. Analog - dijital dönüştürme entegresi, seri iletişimle haberleştiğinden iletişimin hızı oldukça önemlidir. İletişimin hızı kullanılan bilgisayarın hızıyla doğrudan ilgili olduğundan, bilgisayarın hızının öncelikli olarak tespiti gerekir. Bu iş için kullanılan Delphi 3.0 dilinde yazılan “Doktora Projesi-1” adlı, program EK-A1’de verilmiştir.

Hız tespitinin yapılmasından sonra, analog - dijital dönüşüm entegresinden veri iletişimi, yazıcı girişi yardımıyla, bu entegrenin sadece üç pini kullanılarak yapılmaktadır. Hangi ölçüm kanalından okuma yapılacağı ve ölçüme ne zaman başlanılacağı  $D_{in}$  pini kullanılarak, ölçüm sonucu ise  $D_{out}$  pini yardımıyla bilgisayara aktarılmaktadır. Üçüncü pin olan CLK ise  $D_{in}$  ve  $D_{out}$  ile bilgi gönderirken ve alırken senkronizasyonu sağlamaktadır. Bu işlemlerin yapıldığı Delphi 3.0 dilinde yazılan “Doktora Projesi-2” adlı program EK-A2’de verilmiştir.

Bu üniteye ek olarak 20 ölçüm noktasından ölçüm yapabilmek amacıyla, 8 kanal analog giriş yetmediği için 24 kanallı bir analog çoğullayıcı (MUX) devresi tasarlanmıştır. Bu ek birim, 4051 analog anahtar entegreleri ve 74138 decoder entegresi kullanılarak tasarlanmıştır.

#### 4.4.3. Bilgisayar programı

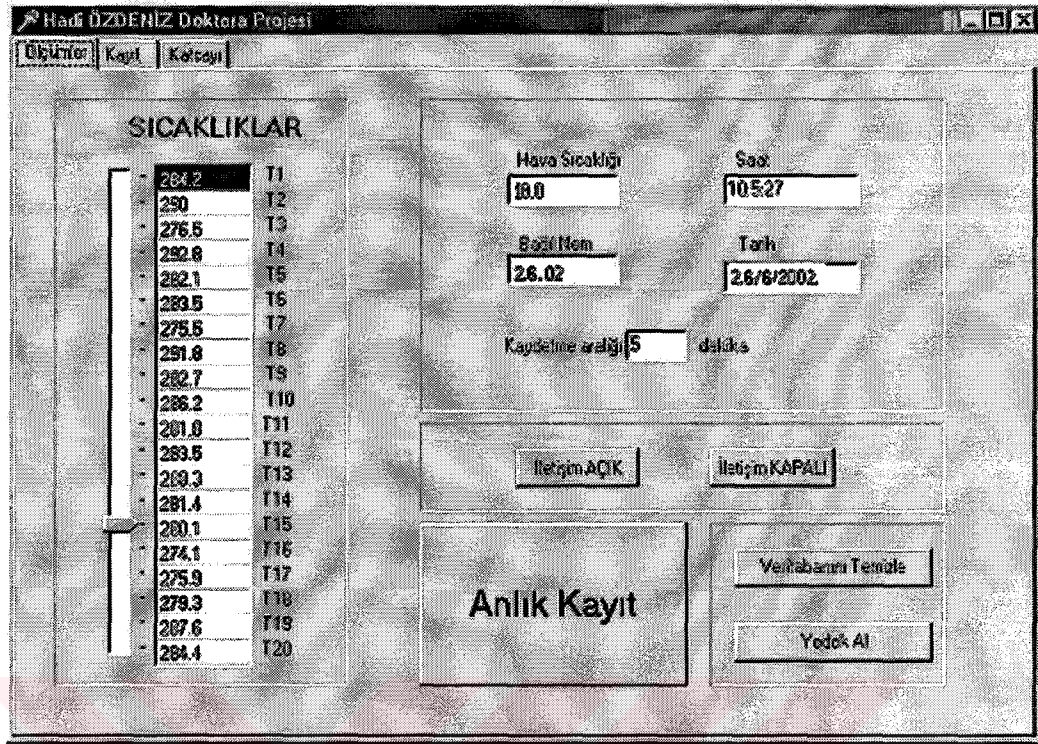
Program görsel ve nesnel yönelimli bir dil olan, Delphi 3.0’de yazılmış ve programda bilgisayar portlarına erişmek amacıyla da Assembler dili rutinleri kullanılmıştır.



Programın özellikleri şunlardır:

1. Süresi ayarlanabilen bir zaman aralığında (herhangi bir değer verilmez ise 5 dakika olarak alınmaktadır) bir ölçüm yapmaktadır.
2. 3 saatte bir tüm ölçüm değerlerinin, iki ayrı yedeği alınmaktadır.
3. Her kanal için ayrı kalibrasyon imkanı mevcuttur.

Program üç adet arayüzden oluşmaktadır. Bu arayüzlerden Şekil 4.13'de görülen birinci arayüz, ölçüm değerlerini görüntülenmektedir. Ölçüm değerleri iki cihazdan gelmektedir. Birincisi, yukarıda da bahsettiğimiz paralel porta bağlı olan analog – dijital dönüştürme ünitesi ve ikincisi, seri porta bağlı olan nem ve sıcaklık ölçen portatif bir ölçü aletidir. Paralel porta bağlı olan ölçüm ünitesinden, yığın içindeki 20 adet sıcaklık sensörü yardımıyla ölçülen 20 adet sıcaklık verisi gelmektedir. Seri portta bağlı olan ölçüm ünitesinden ise havanın nem ve sıcaklık bilgileri gelmektedir. Ayrıca bu arayüzde seri portun açılıp kapanması, ölçüm aralığının değiştirilmesi, test amaçlı olarak anlık kayıtların alınması ve manuel olarak yedekleme işlemlerinin yapılması için düğmeler ve veri kutucukları bulunmaktadır. Sistem saati ve tarih bilgisi, yine bu arayüzdeki iki adet veri kutusunda devamlı olarak gösterilmektedir. Kayıtlarda bu tarih ve saat bilgilerine göre arşivlenmektedir.



Şekil 4.13. Ölçüm değerlerini gösteren birinci arayüz

Şekil 4.14'de görülen ikinci arayüzde, Şekil 4.13'deki arayüzde gösterilen ve istenilen aralıkta otomatik olarak veya anlık kayıt tuşu ile manuel olarak kaydedilen kayıtlar görülmektedir. Bu kayıtlar, arayüzün alt kısmında bulunan tuş takımı ile istenirse teker teker silinebilir veya değiştirilebilir. Bu arayüzde, ölçüm noktasının çok olması nedeniyle ölçüm değerleri iki ayrı tablo halinde gösterilmiştir.

TARİH	SAAT	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10
29/6/2002	10:17:59	31.2	28.2	25.5	34.1	31.4	30.6	25.2	33.5	32.3	32.2
29/6/2002	10:23:0	30.8	28.1	25.6	34.2	30.9	30.5	25.4	33.1	32.3	32.1

T11	T12	T13	T14	T15	T16	T17	T18	T19	T20	HAVASICAK	HAVANEM
34.2	35	27.3	29.8	31.4	274.1	26.3	29.8	26.5	29.6	23.3	51.4
34.2	35.4	26.6	30	31.4	274.1	26.2	29.8	27.3	29.5	23.2	53.5

Şekil 4.14. Ölçüm değerlerinin kaydedildiği yeri gösteren ikinci arayüz

Şekil 4.15'de üçüncü ve son arayüzde, 0 ila 4096 arasında bir sayı olarak gelen 20 adet sıcaklık değerinin santigrad derece (°C) olarak gösterilebilmesi ve kaydedilebilmesi için gerekli katsayı ve offset değerleri bulunmaktadır. Paralel porta bağlı olan ölçüm ünitesinden gelen bu ölçüm değerleri, ünitenin doğası nedeniyle 0 - 4096 arası tamsayı bir değer olarak alınmaktadır. Ünitenin ayarlandığı en yüksek sıcaklık değeri 4096, en düşük sıcaklık değeri ise 0'dır. Aradaki değerler sıcaklıkla doğru orantılıdır ve tam olarak doğrusaldır. Üniteden ayarlanan en düşük sıcaklık değeri üzerinde ince ayar yapmak için offset kullanılmaktadır. Bu ise ölçülecek en küçük sıcaklık değerinde, ölçülen değer de sıfır olabilmesi için sayı eklemesi yapmak anlamına gelmektedir. Bunu aşağıdaki eşitlik ile gösterebiliriz.

$$\text{İstenen değer}[^{\circ}\text{C}] = \text{katsayı} * (\text{sayısal değer}[0-4096] \pm \text{ofset});$$

MEKEMEL NOLANIMININ  
GÜNEŞİ YILDIRIMININ



Her bir ölçüm noktası için ayrı ayrı katsayı ve ofset değerleri vardır ve bunlar değiştirilebilir bir veri tabanında tutulmaktadır.

KATSAYILAR		OFSETLER	
T1	0.140	T1	2065
T2	0.141	T2	2038
T3	0.140	T3	2120
T4	0.142	T4	2033
T5	0.140	T5	2030
T6	0.140	T6	2070
T7	0.1395	T7	2120
T8	0.142	T8	2040
T9	0.140	T9	2076
T10	0.1405	T10	2059
T11	0.1395	T11	2075
T12	0.140	T12	2070
T13	0.142	T13	2065
T14	0.140	T14	2085
T15	0.140	T15	2034
T16	0.139	T16	2123
T17	0.139	T17	2110
T18	0.140	T18	2100
T19	0.142	T19	2070
T20	0.141	T20	2078

Şekil 4.15. Sistemin kalibrasyonunun yapıldığı üçüncü arayüz

Bu programda ölçüm işlemleri TIMER nesnelere kullanılarak yapılmaktadır. Ölçüm değerlerinin belirtilen aralıkta kaydedilmesi, ekrana saat ve takvimin yazılması iki ayrı TIMER kullanılarak yapılmıştır. Ölçüm değerlerinin istenen aralıkta kaydedilmesini sağlayan TIMER1 prosedürü EK-A3'de verilmiştir.:

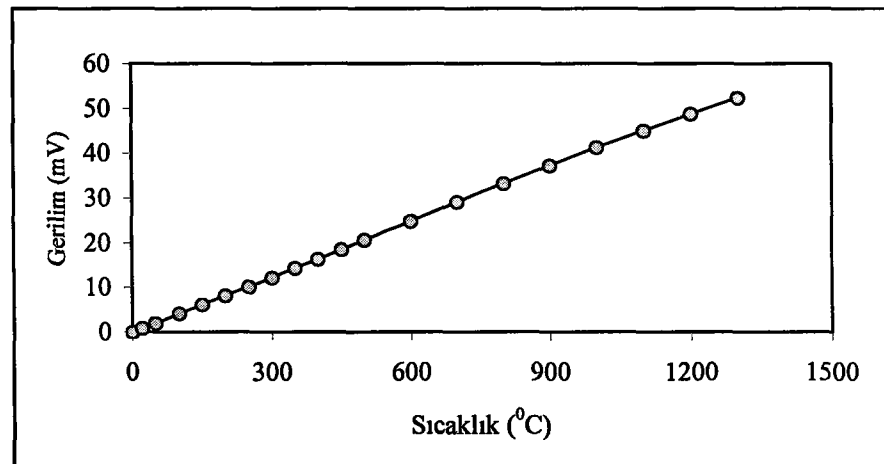
Bu prosedürde aynı zamanda küçük bir yazılım filtresi de bulunmaktadır. 10 tane değer aynı kanaldan okunmakta, daha sonra sıralanarak ortadaki üç değer ortalaması alınmaktadır. Bu bir kayan ortalama filtresi değildir. Uç noktalardan arındıran bir ortalama filtredir ve EK-A4'de verilmiştir.

#### 4.5. Deneysel Çalışmada Kullanılan Aletler

Deneysel çalışmalar sırasında çeşitli cihazlar kullanılmıştır. Yığın içindeki ısı değişimlerini ölçmede kullanılan sensörler, Pt100 (K tipi) olup bu sensöre ait teknik özellikler Çizelge 4.5 ve 4.6'da ve bu çizelgelere ait grafiklerde Şekil 4.16 ve 4.17'de verilmektedir.

Çizelge 4.5. Pt100'in (K tip) teknik özellikleri

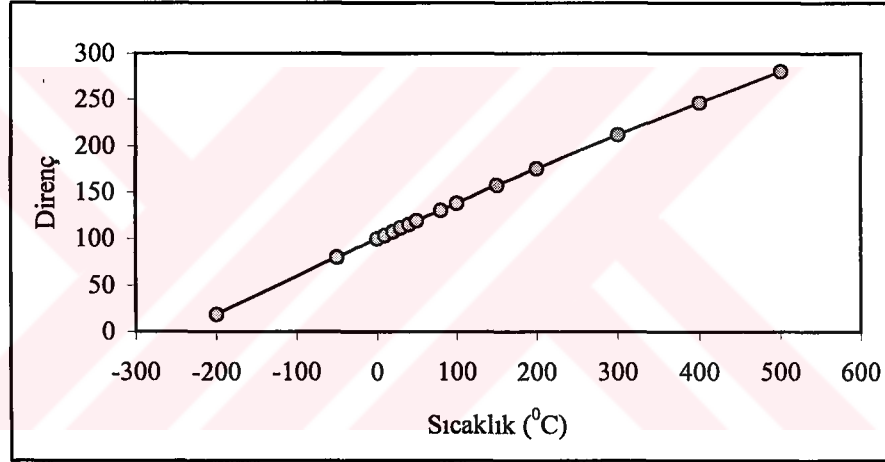
Sıcaklık (°C)	Gerilim (mV)	Sıcaklık (°C)	Gerilim (mV)	Sıcaklık (°C)	Gerilim (mV)
0	0	300	12,207	800	33,277
20	0,798	350	14,292	900	37,325
50	2,022	400	16,395	1000	41,269
100	4,095	450	18,513	1100	45,108
150	6,137	500	20,640	1200	48,828
200	8,137	600	24,902	1300	52,398
250	10,151	700	29,128		



Şekil 4.16. Pt100'ün Gerilim-Sıcaklık grafiği

Çizelge 4.6. Pt100'ün direnç değerleri

Sıcaklık (°C)	Direnç (Ω)	Sıcaklık (°C)	Direnç (Ω)	Sıcaklık (°C)	Direnç (Ω)
-200	18,49	30	111,67	150	157,31
-50	80,31	40	115,54	200	175,84
0	100	50	119,40	300	212,02
10	103,9	80	130,89	400	247,04
20	107,79	100	138,50	500	280,90



Şekil 4.17. Pt100'ün Direnç-Sıcaklık grafiği

Havanın sıcaklık ve nem miktarını ölçmede kullanılan alet Thermohyrometer Model 8711'dir. Bu aletin teknik özellikleri ise Çizelge 4.7'de verilmektedir.

Çizelge 4.7. Thermohygrometer Model 8711'e ait teknik özellikler

Adı	Thermohygrometer Model 8711
Nem ölçüm aralığı- %	10-95
Sıcaklık ölçüm aralığı- °C	-17.77 / 93.27
°C-°F Dönüştürücü	Var
RS 232 çıkışı	Var
Min-Max. Anahtarı	Var
Prob bağlantısı	Var
Çalışma gücü	9 V DC

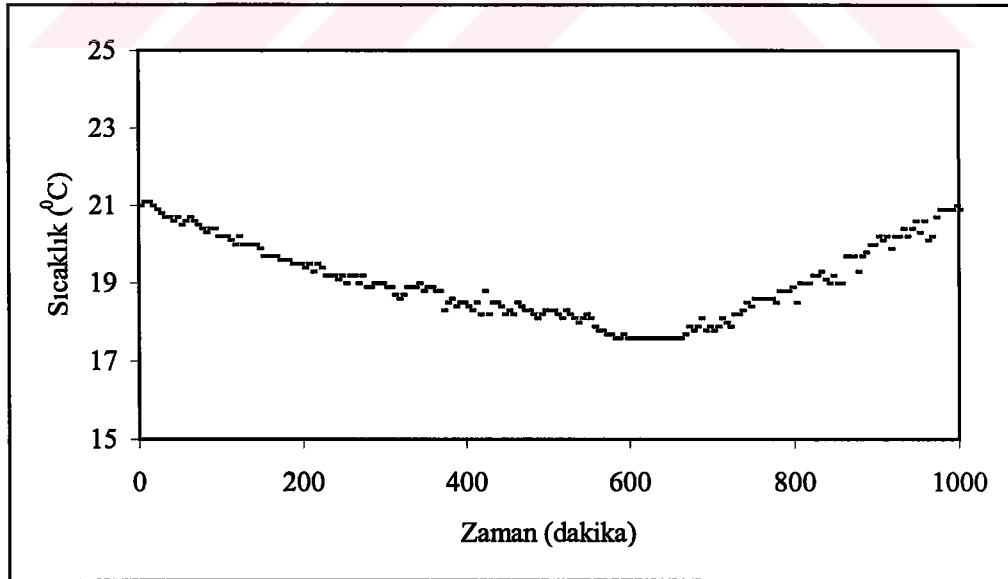
Rüzgar hızını ölçmede kullanılan alet ise Dijital Anemometer Model 8903 olup, teknik özellikleri Çizelge 4.8'de verilmektedir.

Çizelge 4.8. Dijital Anemometer Model 8903 'in teknik özellikleri

Adı	Dijital Anemometer Model 8903
Hava hızı ölçüm aralığı (m/sn)	0.4 - 35
Fan çapı (mm)	70
Çalışma gücü	9 V DC
Ortalama ölçme seçeneği	Var
RS 232 çıkışı	Var

#### 4.6. Araziden Alınan Verilerin İncelenmesi

Kendiliğinden yanmanın tespitine yönelik olarak hazırlanan kömür yığınının, 20 farklı noktada ölçümler alınmıştır. Alınan ölçüm noktalarının şematik gösterimi Şekil 4.9'da verilmektedir. Yığından alınan veriler her 5 dakikada bilgisayar ile otomatik olarak yenilenerek, kayıt yapılmakta ve veri tabanında depolanmaktadır. Her beş dakikada bir istasyon noktalarından alınan verilerin toplamı 20.637 adettir. 22 istasyon noktasından toplam 454.014 adet veri bilgisayar yardımıyla alınmıştır. Bu 22 adet veri istasyonunun, 20 adeti yığın içi sıcaklık sensörü, 1 adeti hava nem ve 1 adeti de hava sıcaklık sensörü bulunmaktadır. Aynı zamanda bilgisayar otomatik olarak bu değerleri okurken, manuel olarak her saat başı 3 istasyon noktasından okumalar alınmıştır. Ölçülen bu değerler; atmosfer basıncı, rüzgar hızı ve rüzgar yönüdür. Bunların toplamı ise 5.157 adettir. Genel toplamda ise 459.171 adet veri alınmıştır. Bu değerleri gösteren tipik bir Çizelge 4.9'da ve T1'e ait 5 dakikalık aralıklarla alınmış değerleri gösteren grafik ise Şekil 4.18'de verilmektedir.



Şekil 4.18. Beş dakikalık aralıklarla ölçülen T1'e ait tipik zaman-sıcaklık eğrisi



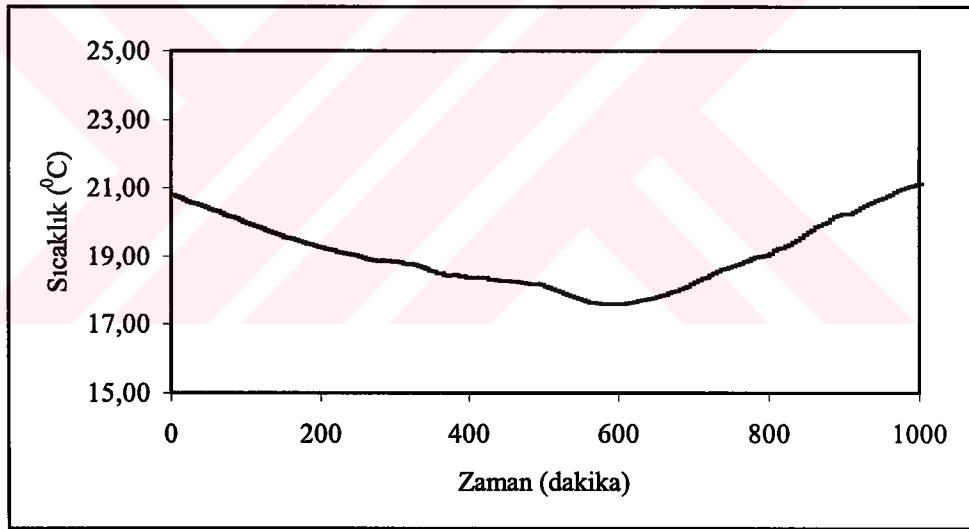
Çizelge 4.9. Beş dakikalık aralıklarla yığımda ölçülen tipik ham değerler

Z	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	T11	T12	T13	T14	T15	T16	t17	T18	T19	T20	S	N
0	21,00	19,60	17,10	25,80	19,40	20,90	17,70	19,90	21,20	21,80	22,80	24,50	20,60	21,50	21,40	18,50	20,20	22,30	18,40	22,10	22,60	38,70
5	21,10	19,70	17,00	25,70	19,40	20,90	17,80	19,90	21,20	21,80	23,00	24,40	21,10	21,40	21,30	18,40	20,10	22,20	18,30	22,40	22,70	39,90
10	21,10	19,70	17,10	25,60	19,30	20,80	17,80	19,80	21,10	21,70	22,90	24,50	21,10	21,30	21,20	18,50	20,20	22,30	18,40	22,30	22,60	40,70
15	21,00	19,60	16,90	25,70	19,20	20,70	17,70	19,40	20,70	21,60	22,70	24,30	21,00	21,20	21,10	18,30	20,00	22,10	18,20	22,20	22,50	41,20
20	20,90	19,50	16,90	25,80	19,20	20,70	17,60	19,70	21,00	21,60	22,90	24,20	20,40	21,40	21,00	18,20	20,10	22,20	18,30	22,10	22,00	43,10
25	20,80	19,40	16,80	25,80	19,10	20,60	17,50	19,40	20,70	21,50	22,10	24,30	20,90	21,00	20,90	18,30	19,90	22,00	18,10	22,10	22,10	42,90
30	20,70	19,30	16,80	25,60	19,10	20,60	17,40	19,20	20,50	21,50	22,00	24,20	20,20	21,10	21,00	18,20	19,80	21,90	18,00	22,00	21,70	44,00
35	20,70	19,30	16,70	25,70	19,20	20,70	17,40	19,60	20,90	21,60	22,60	24,30	20,40	21,10	20,90	18,30	19,80	21,90	18,00	22,00	21,20	44,70
40	20,60	19,20	16,70	25,60	19,00	20,50	17,30	19,60	20,90	21,40	22,70	24,10	20,40	20,90	20,80	18,10	20,00	22,10	18,20	22,10	20,60	45,10
45	20,70	19,30	16,70	25,70	19,10	20,60	17,40	19,20	20,50	21,50	22,60	24,20	20,70	21,10	21,00	18,20	19,80	21,90	18,00	21,90	20,30	44,70
50	20,50	19,10	16,70	25,50	19,00	20,50	17,20	19,50	20,80	21,40	22,40	24,30	20,50	21,00	20,90	18,30	19,80	21,90	18,00	21,90	20,50	44,90
55	20,60	19,20	16,60	25,60	19,10	20,60	17,30	19,10	20,40	21,50	22,60	24,10	20,60	21,10	21,00	18,10	19,80	21,90	18,00	21,90	20,50	46,00
60	20,70	19,30	16,60	25,40	19,10	20,60	17,40	19,10	20,40	21,50	22,00	24,00	20,70	21,00	20,90	18,00	20,00	22,10	18,20	21,90	20,20	48,00
65	20,60	19,20	16,50	25,40	19,00	20,50	17,30	19,00	20,30	21,40	22,20	24,00	20,60	20,90	20,80	18,00	19,90	22,00	18,10	22,00	20,00	48,90
70	20,50	19,10	16,50	25,40	18,80	20,30	17,20	18,90	20,20	21,20	22,30	24,00	19,90	21,00	20,90	18,00	19,80	21,90	18,00	21,90	19,90	49,00
75	20,40	19,00	16,50	25,30	18,70	20,20	17,10	19,20	20,50	21,10	22,30	24,10	20,10	21,00	20,90	18,10	19,80	21,90	18,00	21,80	19,70	49,60
80	20,30	18,90	16,60	25,30	18,50	20,00	17,00	19,20	20,50	20,90	22,10	24,00	20,00	20,90	20,80	18,00	19,60	21,70	17,80	21,60	19,70	49,80
85	20,40	19,00	16,30	25,30	18,60	20,10	17,10	19,10	20,40	21,00	22,30	23,90	20,40	20,60	20,50	17,90	19,70	21,80	17,90	21,50	19,50	51,50
90	20,40	19,00	16,30	25,10	18,70	20,20	17,10	19,10	20,40	21,10	22,00	23,80	20,40	20,70	20,60	17,80	19,50	21,60	17,70	21,50	19,30	51,20
95	20,20	18,80	16,20	25,10	18,70	20,20	16,90	19,10	20,40	21,10	22,00	24,00	19,90	20,50	20,40	18,00	19,60	21,70	17,80	21,40	18,90	52,30
100	20,20	18,80	16,10	25,10	18,50	20,00	16,90	18,90	20,20	20,90	22,20	24,10	19,70	20,70	20,60	18,10	19,50	21,60	17,70	21,30	18,60	53,60
105	20,20	18,80	16,10	25,10	18,50	20,00	16,90	18,90	20,20	20,90	22,20	24,00	20,20	20,80	20,70	18,00	19,40	21,50	17,60	21,00	18,60	52,60
110	20,10	18,70	16,00	25,10	18,60	20,10	16,80	18,90	20,20	21,00	21,80	23,90	19,60	20,70	20,60	17,90	19,30	21,40	17,50	21,20	18,50	52,80
115	20,00	18,60	16,00	25,00	18,40	19,90	16,70	18,90	20,20	20,80	21,90	24,00	19,50	20,70	20,60	18,00	19,30	21,40	17,50	21,40	18,60	52,90
120	20,20	18,80	15,90	24,90	18,50	20,00	16,90	18,80	20,10	20,90	22,00	24,00	20,20	20,40	20,30	18,00	19,00	21,10	17,20	21,10	18,30	54,30
125	20,00	18,60	15,80	24,80	18,50	20,00	16,70	18,80	20,10	20,90	22,00	23,80	19,60	20,30	20,20	17,80	18,60	20,70	16,80	20,70	17,70	55,80
130	20,00	18,60	16,00	24,80	18,30	19,80	16,70	18,70	20,00	20,70	21,90	23,60	20,00	20,70	20,60	17,60	18,70	20,80	16,90	20,80	17,40	56,80
135	20,00	18,60	16,00	24,80	18,40	19,90	16,70	18,10	19,40	20,80	21,90	23,70	19,40	20,50	20,40	17,70	18,20	20,30	16,40	20,30	17,50	55,90
140	20,00	18,60	15,80	24,80	18,40	19,90	16,70	18,60	19,90	20,80	21,80	23,50	19,70	20,60	20,50	17,50	18,90	21,00	17,10	21,00	17,00	57,70
145	19,90	18,50	15,80	24,70	18,20	19,70	16,60	18,70	20,00	20,60	21,60	23,70	19,90	20,20	20,10	17,70	18,80	20,90	17,00	20,90	16,70	58,30
150	19,70	18,30	15,80	24,70	18,30	19,80	16,40	18,50	19,80	20,70	21,30	23,50	19,70	20,40	20,30	17,50	18,70	20,80	16,90	20,80	16,60	58,50

Z= Zaman (dakika), S= Hava sıcaklığı (°C)

N= Nem (%), T= Yığın içi sıcaklık (°C)

Ölçülen bu ham veriler hareketli ortalama filtre yöntemi (Moving Average Filter) (Canan ve ark., 1998) ile excel programında filtrelenmiştir. Bu filtrelemenin yapılmasının nedeni, elektrik şebekesindeki gerilim dalgalanmalarının ve istasyon yakınında çalışan büyük makinelerin (greyder, dozer gibi) sistem üzerindeki etkilerini yok etmek içindir. Filtreleme aşağıdaki şekilde yapılmıştır: T1 istasyon noktasının 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11 ve 12 değerlerinin aritmetik ortalaması alınarak, T1'in filtrelenmiş ilk değeri bulunur. 2. değeri için 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12 ve 13 değerlerinin aritmetik ortalaması alınarak, T2'in filtrelenmiş ikinci değeri bulunur. Bu T1'in bütün değerleri için yapılır. Filtrelenmiş verilere tipik bir örnek Çizelge 4.10'da ve T1'e ait 5 dakika arayla alınmış değerleri gösteren grafik Şekil 4.19'da verilmektedir.

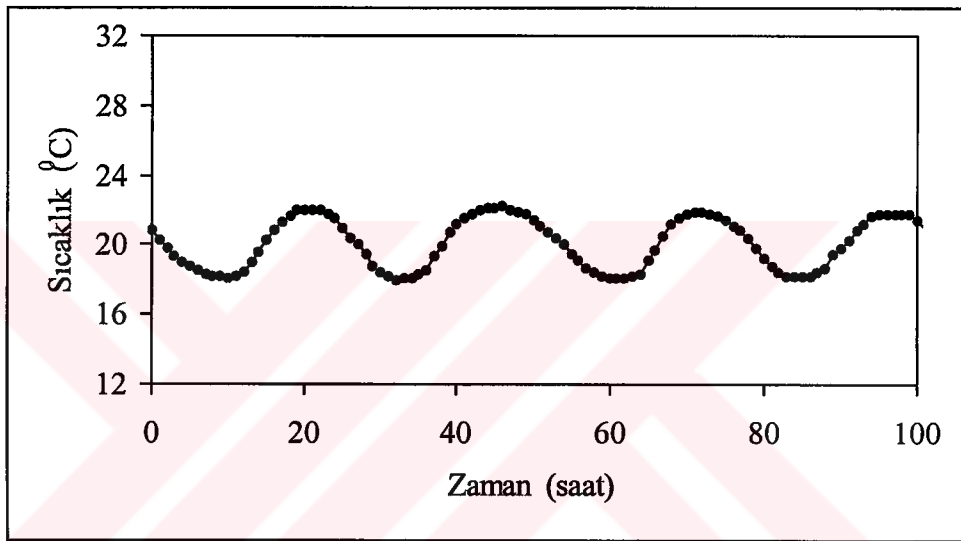


Şekil 4.19. Beş dakikalık aralıklarla ölçülen T1'e ait tipik filtrelenmiş zaman-sıcaklık eğrisi

Çizelge 4.10. Beş dakikalık aralıklarla yığından ölçülen ham verilerin filtrelendikten sonra aldıkları tipik değerler.

Z	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	T11	T12	T13	T14	T15	T16	T17	T18	T19	T20	S	N
0	20,80	19,40	16,82	25,65	19,17	20,67	17,50	19,49	20,79	21,57	22,56	24,26	20,66	21,16	21,03	18,26	19,96	22,06	18,16	22,07	21,50	43,38
5	20,77	19,37	16,77	25,62	19,14	20,64	17,47	19,42	20,72	21,54	22,52	24,22	20,66	21,12	20,98	18,22	19,94	22,04	18,14	22,06	21,30	44,16
10	20,72	19,32	16,73	25,60	19,09	20,59	17,42	19,35	20,65	21,49	22,46	24,19	20,57	21,08	20,95	18,19	19,92	22,02	18,12	22,02	21,08	44,86
15	20,67	19,27	16,68	25,58	19,05	20,55	17,37	19,30	20,60	21,45	22,42	24,16	20,49	21,06	20,93	18,16	19,88	21,98	18,08	21,98	20,86	45,55
20	20,62	19,22	16,66	25,55	18,99	20,49	17,32	19,28	20,58	21,39	22,37	24,14	20,42	21,04	20,91	18,14	19,85	21,95	18,05	21,94	20,65	46,21
25	20,58	19,18	16,62	25,51	18,95	20,45	17,28	19,24	20,54	21,35	22,32	24,12	20,42	20,98	20,87	18,12	19,82	21,92	18,02	21,89	20,45	46,85
30	20,55	19,15	16,58	25,45	18,92	20,42	17,25	19,22	20,52	21,32	22,32	24,08	20,38	20,95	20,85	18,08	19,79	21,89	17,99	21,85	20,24	47,49
35	20,51	19,11	16,53	25,42	18,88	20,38	17,21	19,21	20,51	21,28	22,32	24,06	20,35	20,91	20,80	18,06	19,78	21,88	17,98	21,80	20,02	48,13
40	20,47	19,07	16,48	25,37	18,83	20,33	17,17	19,15	20,45	21,23	22,28	24,05	20,30	20,88	20,78	18,05	19,75	21,85	17,95	21,75	19,82	48,82
45	20,44	19,04	16,44	25,33	18,79	20,29	17,14	19,10	20,40	21,19	22,25	24,04	20,28	20,87	20,77	18,04	19,71	21,81	17,91	21,66	19,67	49,39
50	20,39	18,99	16,38	25,28	18,75	20,25	17,09	19,08	20,38	21,15	22,18	24,02	20,20	20,84	20,74	18,02	19,67	21,77	17,87	21,61	19,53	50,02
55	20,35	18,95	16,33	25,25	18,71	20,21	17,05	19,03	20,33	21,11	22,15	23,99	20,12	20,82	20,72	17,99	19,63	21,73	17,83	21,57	19,38	50,63
60	20,32	18,92	16,28	25,19	18,66	20,16	17,02	19,01	20,31	21,06	22,10	23,98	20,09	20,76	20,66	17,98	19,57	21,67	17,77	21,51	19,22	51,27
65	20,27	18,87	16,22	25,15	18,62	20,12	16,97	18,98	20,28	21,02	22,10	23,97	20,01	20,71	20,61	17,97	19,46	21,56	17,66	21,42	19,02	51,87
70	20,22	18,82	16,18	25,10	18,56	20,06	16,92	18,96	20,26	20,96	22,08	23,94	19,96	20,69	20,59	17,94	19,37	21,47	17,57	21,32	18,82	52,48
75	20,18	18,78	16,14	25,05	18,53	20,03	16,88	18,90	20,20	20,93	22,05	23,92	19,92	20,65	20,55	17,92	19,25	21,35	17,45	21,20	18,64	53,01
80	20,15	18,75	16,08	25,02	18,51	20,01	16,85	18,85	20,15	20,91	22,01	23,87	19,89	20,62	20,52	17,87	19,18	21,28	17,38	21,14	18,43	53,63
85	20,12	18,72	16,02	24,97	18,48	19,98	16,82	18,82	20,12	20,88	21,97	23,85	19,88	20,57	20,47	17,85	19,12	21,22	17,32	21,08	18,20	54,28
90	20,07	18,67	15,98	24,92	18,46	19,96	16,77	18,77	20,07	20,86	21,89	23,82	19,83	20,55	20,45	17,82	19,04	21,14	17,24	21,03	17,98	54,82
95	20,02	18,62	15,94	24,89	18,43	19,93	16,72	18,72	20,02	20,83	21,83	23,79	19,78	20,55	20,45	17,79	18,98	21,08	17,18	20,98	17,75	55,39
100	19,98	18,58	15,90	24,86	18,39	19,89	16,68	18,68	19,96	20,79	21,76	23,75	19,76	20,53	20,43	17,75	18,91	21,01	17,11	20,93	17,55	55,90
105	19,94	18,54	15,85	24,82	18,36	19,86	16,64	18,62	19,92	20,76	21,68	23,70	19,76	20,51	20,41	17,70	18,84	20,94	17,04	20,88	17,41	56,27
110	19,89	18,49	15,81	24,77	18,33	19,83	16,59	18,58	19,88	20,73	21,63	23,66	19,72	20,48	20,38	17,66	18,78	20,88	16,98	20,86	17,25	56,77
115	19,85	18,45	15,75	24,72	18,28	19,78	16,55	18,55	19,85	20,68	21,61	23,62	19,72	20,45	20,35	17,62	18,72	20,82	16,92	20,82	17,10	57,24
120	19,82	18,42	15,71	24,68	18,25	19,75	16,52	18,49	19,79	20,65	21,58	23,58	19,72	20,42	20,32	17,58	18,64	20,74	16,84	20,74	16,92	57,69
125	19,77	18,37	15,65	24,64	18,21	19,71	16,47	18,45	19,75	20,61	21,52	23,54	19,67	20,41	20,31	17,54	18,54	20,64	16,74	20,64	16,75	58,18
130	19,73	18,33	15,62	24,61	18,17	19,67	16,43	18,40	19,70	20,57	21,48	23,48	19,66	20,41	20,31	17,48	18,52	20,62	16,72	20,62	16,61	58,58
135	19,69	18,29	15,57	24,57	18,14	19,64	16,39	18,36	19,66	20,54	21,45	23,45	19,62	20,38	20,28	17,45	18,46	20,56	16,66	20,56	16,46	58,97
140	19,65	18,25	15,52	24,54	18,11	19,61	16,35	18,37	19,67	20,51	21,37	23,40	19,59	20,36	20,26	17,40	18,48	20,58	16,68	20,58	16,33	59,31
145	19,61	18,21	15,48	24,49	18,06	19,56	16,31	18,33	19,63	20,46	21,33	23,37	19,58	20,33	20,23	17,37	18,43	20,53	16,63	20,53	16,26	59,45
150	19,56	18,16	15,45	24,46	18,04	19,54	16,26	18,28	19,58	20,44	21,29	23,32	19,50	20,33	20,23	17,32	18,39	20,49	16,59	20,49	16,20	59,60

Daha sonra filtrelenmiş verilerden oluşan bu değerler üzerindeki ölçüm aralık sıklığı 5 dakika düzeyinden, 1 saatlik seviyeye yükseltilmiştir. Diğer bir anlatımla, her bir saatteki değerler seçilerek yeni bir tablo oluşturulmuştur. Oluşturulan saatlik değerleri 24 saate kadar gösteren tipik bir Çizelge 4.11'de ve 100 saate kadar T1'e ait tipik bir grafik ise Şekil 4.20'de gösterilmektedir. T1 ve diğer bütün noktalara ait grafikler EK-B'de verilmektedir.



Şekil 4.20. Bir saat aralıklarla ölçülmüş ve filtrelenmiş T1'e ait 100 saatlik zaman-sıcaklık grafiği

Çizelge 4.1.1. Bir saat aralıklarla ölçülmüş ve filtrelenmiş değerler

Z	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	T11	T12	T13	T14	T15	T16	T17	T18	T19	T20	S	N	B	RH	RY
0	20,80	19,40	16,82	25,65	19,17	20,67	17,50	19,49	20,79	21,57	22,56	24,08	20,66	21,16	21,03	18,26	19,96	20,87	18,16	22,07	21,50	43,38	917,9	1,02	WE
1	20,32	18,92	16,28	25,19	18,66	20,16	17,02	19,01	20,31	21,06	22,10	23,55	20,09	20,76	20,66	17,98	19,57	20,31	17,77	21,51	19,22	51,27	918,0	0,88	WE
2	19,82	18,42	15,71	24,68	18,25	19,75	16,52	18,49	19,79	20,65	21,58	23,07	19,72	20,42	20,32	17,58	18,64	19,54	17,26	20,74	16,92	57,69	918,0	0,62	WE
3	19,38	17,98	15,25	24,25	17,82	19,32	16,08	17,94	19,24	20,22	21,18	22,67	19,27	20,08	20,05	16,98	18,08	19,03	16,71	20,23	15,75	61,20	917,9	1,41	NS
4	19,05	17,65	14,93	23,85	17,59	19,09	15,75	17,74	19,04	19,99	20,79	22,38	18,92	19,85	19,73	16,47	17,75	18,65	16,15	19,85	14,35	65,97	917,4	1,62	NS
5	18,84	17,44	14,69	23,72	17,33	18,83	15,54	17,50	18,80	19,73	20,68	22,19	18,78	19,42	19,38	16,16	17,38	18,28	15,73	19,48	13,27	69,66	917,1	1,78	NS
6	18,51	17,11	14,47	23,26	17,18	18,68	15,21	17,33	18,56	19,42	20,27	21,85	18,42	18,99	19,11	15,87	17,13	18,13	15,33	19,39	12,38	71,52	916,5	2,04	NS
7	18,37	16,97	14,21	23,00	16,82	18,32	15,07	17,14	18,28	19,22	20,06	21,51	18,07	18,68	18,66	15,54	16,89	18,02	15,09	19,22	11,70	72,75	915,8	2,14	NS
8	18,18	16,78	14,02	22,79	16,60	18,10	14,88	16,89	18,00	19,07	19,82	21,32	17,87	18,48	18,34	15,36	16,56	17,88	15,03	19,08	10,76	75,89	915,8	2,20	NS
9	18,16	16,75	13,88	22,75	16,48	18,00	14,77	16,77	18,00	18,96	19,71	21,22	17,76	18,33	18,20	15,30	16,47	17,80	15,00	18,90	10,18	77,79	915,8	1,62	WE
10	18,09	16,63	13,95	22,64	16,45	18,05	14,66	16,68	17,98	19,01	19,71	21,26	17,80	18,34	18,13	15,37	16,47	17,93	15,03	19,00	10,22	80,54	915,8	1,66	WE
11	18,21	16,80	14,00	22,88	16,52	18,16	14,84	16,83	18,22	19,10	19,89	21,45	17,82	18,36	18,23	15,60	16,65	18,00	15,31	19,10	11,78	77,85	916,7	1,35	WE
12	18,45	17,05	14,41	23,42	16,70	18,40	15,15	17,08	18,38	19,36	20,24	21,55	18,35	18,72	18,37	16,13	17,11	18,32	15,66	19,34	14,65	69,72	916,9	1,12	NS
13	18,97	17,57	14,74	23,95	17,17	18,67	15,67	17,40	19,02	19,57	20,85	22,18	18,94	19,40	18,80	16,46	17,91	18,77	16,11	19,97	16,48	59,85	918,2	1,08	NS
14	19,56	18,16	15,42	24,45	17,82	19,32	16,26	17,81	19,70	20,22	21,60	22,82	19,54	19,93	19,33	17,21	18,62	19,53	16,82	20,73	22,35	46,65	918,3	0,85	WE
15	20,26	18,86	15,86	25,16	18,29	19,79	16,96	18,29	20,35	20,69	22,20	23,35	20,17	20,48	19,88	17,86	19,05	20,18	17,25	21,11	25,05	34,84	918,2	0,70	WE
16	20,82	19,42	16,36	25,74	18,85	20,35	17,52	18,89	20,86	21,25	23,05	23,95	20,82	21,07	20,47	18,64	19,77	20,80	18,27	21,82	27,36	26,35	918,2	0,72	NS
17	21,28	19,88	16,83	26,17	19,36	20,86	17,98	19,48	21,36	21,76	23,57	24,36	21,44	21,53	20,93	19,20	20,44	21,45	18,90	22,23	28,79	24,38	917,7	0,65	NS
18	21,65	20,25	17,04	26,62	19,52	21,02	18,35	19,86	21,51	22,06	23,88	24,89	21,68	22,08	21,48	19,54	21,01	21,78	19,25	22,73	30,25	22,62	917,5	0,60	NS
19	21,95	20,55	17,37	26,93	19,89	21,39	18,65	20,12	21,80	22,29	24,00	25,18	21,82	22,28	21,84	19,74	21,20	22,07	19,42	22,93	31,05	21,92	917,5	0,65	NS
20	21,98	20,58	17,43	27,01	19,92	21,42	18,68	20,08	21,96	22,50	24,17	25,39	21,90	22,42	21,95	19,88	21,38	22,23	19,58	23,32	31,01	21,59	916,9	0,50	NS
21	22,05	20,65	17,35	26,89	19,94	21,44	18,75	19,86	21,99	22,34	24,12	25,38	21,82	22,40	21,91	19,86	21,41	22,28	19,61	23,48	30,25	22,41	916,9	0,40	NS
22	21,96	20,55	17,35	26,60	19,78	21,44	18,65	19,63	21,96	22,34	24,00	25,24	21,77	22,35	21,75	19,57	21,32	22,24	19,52	23,44	27,85	26,68	916,9	0,00	0
23	21,80	20,18	17,00	26,31	19,49	21,22	18,28	19,15	21,76	22,12	23,67	24,95	21,42	21,95	21,35	19,36	20,98	21,87	19,32	23,25	25,58	33,74	916,4	0,00	0
24	21,57	19,62	16,71	25,94	19,06	20,56	17,72	18,70	21,11	21,46	23,36	24,30	20,91	21,46	20,93	18,91	20,35	21,20	18,55	22,80	23,38	39,94	916,2	0,00	0

Z= Zaman (saat),

S= Hava sıcaklığı (°C)

N= Nem (%),

T= Yiğın içi sıcaklık (°C)

RH= Rüzgar hızı (m/sn)

B= Atmosfer basıncı (mb)



#### 4.7. Kendiliğinden Tutuşmuş Stoklardan Alınan Ölçümler

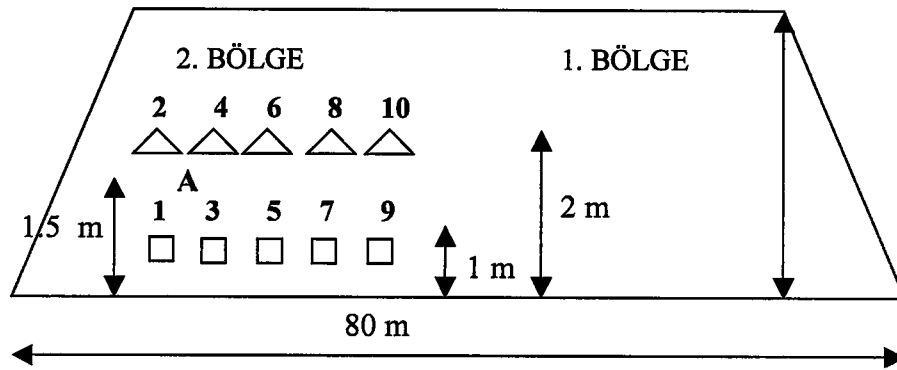
Arazide oluşturulan stok kömürler üzerinde her iki yılda da kendiliğinden yanma olayı meydana gelmemiştir. İşletmenin kendi yaptığı diğer stoklarda her iki yılda da kendiliğinden yanma oluştuğu için, bu stoklar üzerinde 214 saatlik sıcaklık ölçümleri yapılmıştır. Ayrıca bu kömürlere kısa kömür analizleri uygulanmıştır. Kısa kömür analizi Çizelge 4.12’de verilmektedir.

Çizelge 4.12. GLİ-Tunçbilek stok sahasında yanan bir stoğun kısa kömür analizi.

Ebat (mm)	Nem (%)	Kül (%)	Kalori (kcal/kg)	Uçucu madde (%)	Yanıcı Kükürt (%)
18-50	5.2	55.5	2646	21.95	1.68

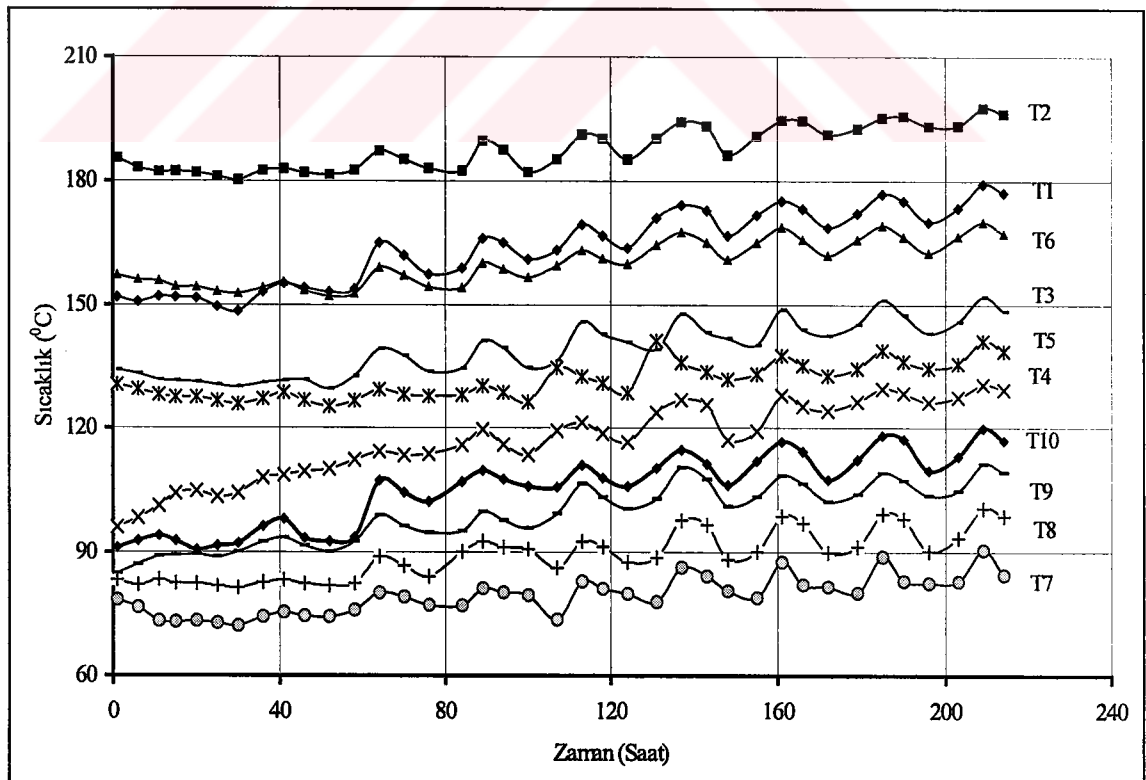
Bu çizelgeden görüldüğü üzere, nem azalınca kendiliğinden yanma meydana gelmiştir. Kalori 4500-5000 kcal/kg seviyelerinden, 2646 kcal/kg seviyesine düşmüştür.

Stoğun iki farklı bölgesinden sıcaklık ölçümleri alınmıştır. Stok yüksekliği 8 m, eni 17 m, uzunluğu ise 80 m civarındadır. 1, 3, 5, 7, 9’olu istasyon noktaları yerden 1 m yüksekliğe, 2, 4, 6, 8, ve 10 nolu istasyon noktaları yerden 2 m yüksekliğe yerleştirilmiştir. Ayrıca 1,5 m’de bulunan A nolu istasyon noktasından, karbonmonoksit (CO) okumalar alınmıştır. CO ölçümleri Fluke CO-220 marka, Kanada yapımı olan bir cihaz ile alınmıştır. Bu stoğa yerleştirilen sıcaklık sensörlerinin şematik gösterimi Şekil 4.21’de verilmektedir.



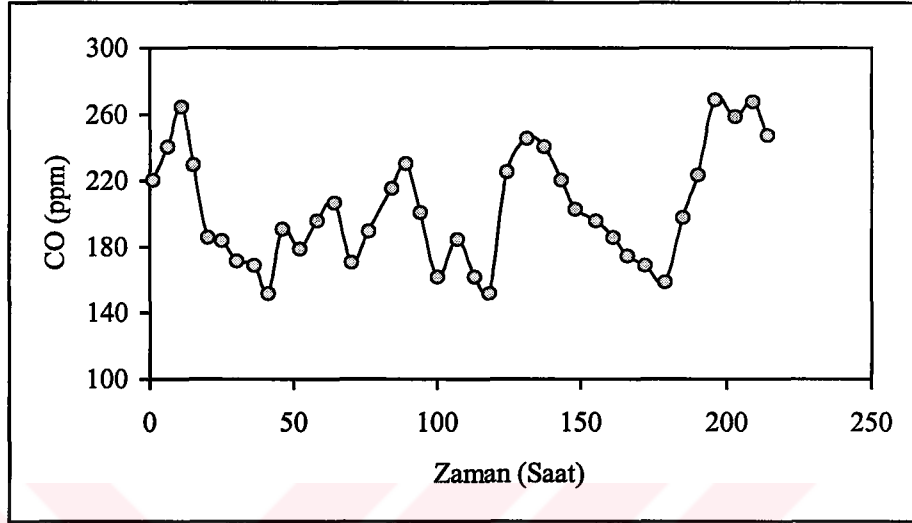
Şekil 4.21. Stoğun boy kesitini gösteren şematik gösterim.

Bu stoğun 1. bölgesindeki okumaların hepsinde sıcaklıkların  $200^{\circ}\text{C}$ 'nin üzerinde olduğu tespit edilmiştir. Bu yüzden stoğun iki nolu bölgesinde tekrar ölçümler yapılmıştır. Bu değerleri gösteren grafik Şekil 4.22'de, CO ölçümlerini gösteren grafik ise Şekil 4.23'de verilmektedir.



Şekil 4.22. Kendiliğinden tutuşan stokta zaman-sıcaklık eğrileri

Bu grafikten görüleceği üzere, istasyon noktalarındaki sıcaklık artışları, artan bir eğilimde olduğu gözlenmiştir.



Şekil 4.23. GLİ-Tunçbilek İşletme sahasında kendiliğinden yanan stokta ölçülen CO değerlerini gösteren grafik.

Yanan stoktaki kalori düşüşü Çizelge 4.12'den de açık şekilde görüldüğü üzere çok fazladır ve ciddi ekonomik kayıplar söz konusudur.



## 5. ARAZİ ÖLÇÜM SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

### 5.1. İstatistik Analizler

Kömürler uygun çevre koşullarını buldukları zaman, kendiliğinden yanma olayı kaçınılmazdır. Bu çalışmada, stoklardaki kömür yığınlarının atmosfer şartlarında gösterdikleri tepkileri açıklayabilmek amacıyla, etkili olan parametreler arasındaki ilişkiler incelenmiştir. Bu parametreler yardımıyla, istatistiksel analiz yöntemi kullanılarak Tunçbilek kömürleri için geçerli olan bir matematiksel model geliştirilmiştir. Bu model aracılığıyla, işletmedeki yığınların sıcaklık değişim davranışları önceden doğruluğu yüksek bir şekilde tahmin edilebilecektir.

Bu nedenle, araziden elde edilen filtrelenmiş saatlik değerlere, regresyon analizleri uygulanmıştır. Çalışmanın ilk aşamasında, yığın içinde bulunan sıcaklık sensörlerine etki eden 5 adet parametre ile arasındaki ilişkileri belirlemek amacıyla basit regresyon analizleri yapılmıştır. Basit regresyon analizleri gerçekleştirilirken doğrusal, üssel, geometrik ve logaritmik fonksiyonlar olarak ayrı ayrı analizlere tabi tutulmuş ve elde edilen sonuçlarda  $R^2$  değerleri çok düşük değerlerde çıkmıştır. Fakat polinom fonksiyonunda değerlendirme yapıldığında,  $R^2$  değerinin yüksek değerlerde çıktığı görülmüştür. Bu nedenle ölçüm değerlerini en iyi yansıtan fonksiyon türünün polinom fonksiyonu olduğu görülmüştür.

Kömür yığını üzerinde etkili olan tüm parametreleri kapsayan bir model geliştirilmeye çalışılmıştır. Bu amaçla SPSS 9.0 istatistik programı kullanılarak, çoklu regresyon analizleri yapılmıştır. Analizlerde fonksiyon geliştirilirken, gözlemlenen ve aşağıda maddeler halinde verilen mantıksal hususlar tespit edilmiştir:

- 1- Yığından alınan sıcaklık ölçümleri zaman ile doğru orantılıdır.
- 2- Yığından alınan sıcaklık ölçümleri hava sıcaklığı ile doğru orantılıdır.
- 3- Hava sıcaklığı ile havanın nemi arasında ters orantı olduğu görülmüştür.

4- Gözlemlerden hava sıcaklığı ile atmosfer basıncı arasında ters orantı olduğu görülmüştür.

Bu maddelerin ışığı altında, aşağıda verilen istatistik modelin en kabul edilebilir değerleri verdiği görülmüştür. Elde edilen istatistik model aşağıda sunulmuştur.

$T = f \{ \text{zaman, hava sıcaklığı, nem, atmosfer basıncı} \}$

$Z = \text{zaman, } S = \text{hava sıcaklığı, } N = \text{havanın nemi, } B = \text{atmosfer basıncı}$

Katsayılar = (A, C, Ç, D, E, F, G, Ğ, H, J, I, İ, K, L, M, O, Ö, P, R, Ş, U, Ü, V, Y, Z)

$$S_i = C \cdot S + \text{Ç} \cdot S^2 + D \cdot S^3 + E \cdot S^4 + F \cdot S^5 + G \cdot S^6$$

$$Z_i = \text{Ğ} \cdot Z + H \cdot Z^2 + J \cdot Z^3 + I \cdot Z^4 + \text{İ} \cdot Z^5 + K \cdot Z^6$$

$$N_i = L \cdot N + M \cdot N^2 + O \cdot N^3 + \text{Ö} \cdot N^4 + P \cdot N^5 + R \cdot N^6$$

$$B_i = \text{Ş} \cdot B + U \cdot B^2 + \text{Ü} \cdot B^3 + V \cdot B^4 + Y \cdot B^5 + Z \cdot B^6$$

$$T_i = A \times \left[ \frac{S_i + Z_i}{N_i + B_i} \right] \quad (5.1)$$

Üstel değerler arttıkça fonksiyonun  $R^2$  değeri de artmaktadır. Elde edilen model ile arazide ölçülen değerler arasındaki  $T_1$ 'e ait grafik Şekil 5.1'de verilmektedir. Bu grafiğin net olarak görülmesi için 300 saate ait gösterim Şekil

4- Gözlemlerden hava sıcaklığı ile atmosfer basıncı arasında ters orantı olduğu görülmüştür.

Bu maddelerin ışığı altında, aşağıda verilen istatistik modelin en kabul edilebilir değerleri verdiği görülmüştür. Elde edilen istatistik model aşağıda sunulmuştur.

$T = f \{ \text{zaman, hava sıcaklığı, nem, atmosfer basıncı} \}$

$Z = \text{zaman, } S = \text{hava sıcaklığı, } N = \text{havanın nemi, } B = \text{atmosfer basıncı}$

Katsayılar = (A, C, Ç, D, E, F, G, Ğ, H, J, I, İ, K, L, M, O, Ö, P, R, Ş, U, Ü, V, Y)

$$S_i = A \cdot S + C \cdot S^2 + \text{Ç} \cdot S^3 + D \cdot S^4 + E \cdot S^5 + F \cdot S^6$$

$$Z_i = G \cdot Z + \text{Ğ} \cdot Z^2 + H \cdot Z^3 + J \cdot Z^4 + I \cdot Z^5 + \text{İ} \cdot Z^6$$

$$N_i = K \cdot N + L \cdot N^2 + M \cdot N^3 + O \cdot N^4 + \text{Ö} \cdot N^5 + P \cdot N^6$$

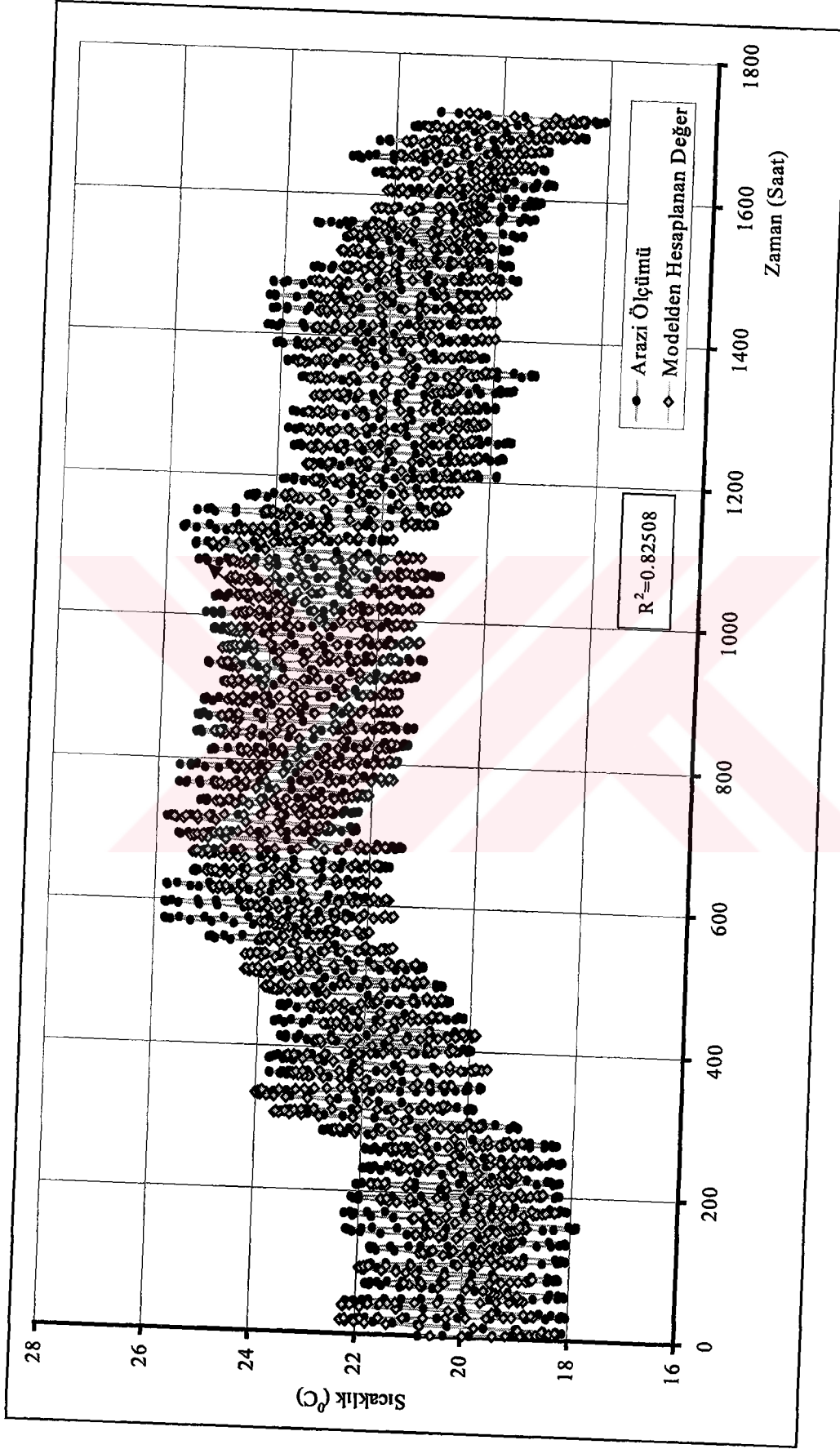
$$B_i = R \cdot B + \text{Ş} \cdot B^2 + U \cdot B^3 + \text{Ü} \cdot B^4 + V \cdot B^5 + Y \cdot B^6$$

$$T_i = \frac{S_i + Z_i}{N_i + B_i} \quad (5.1)$$

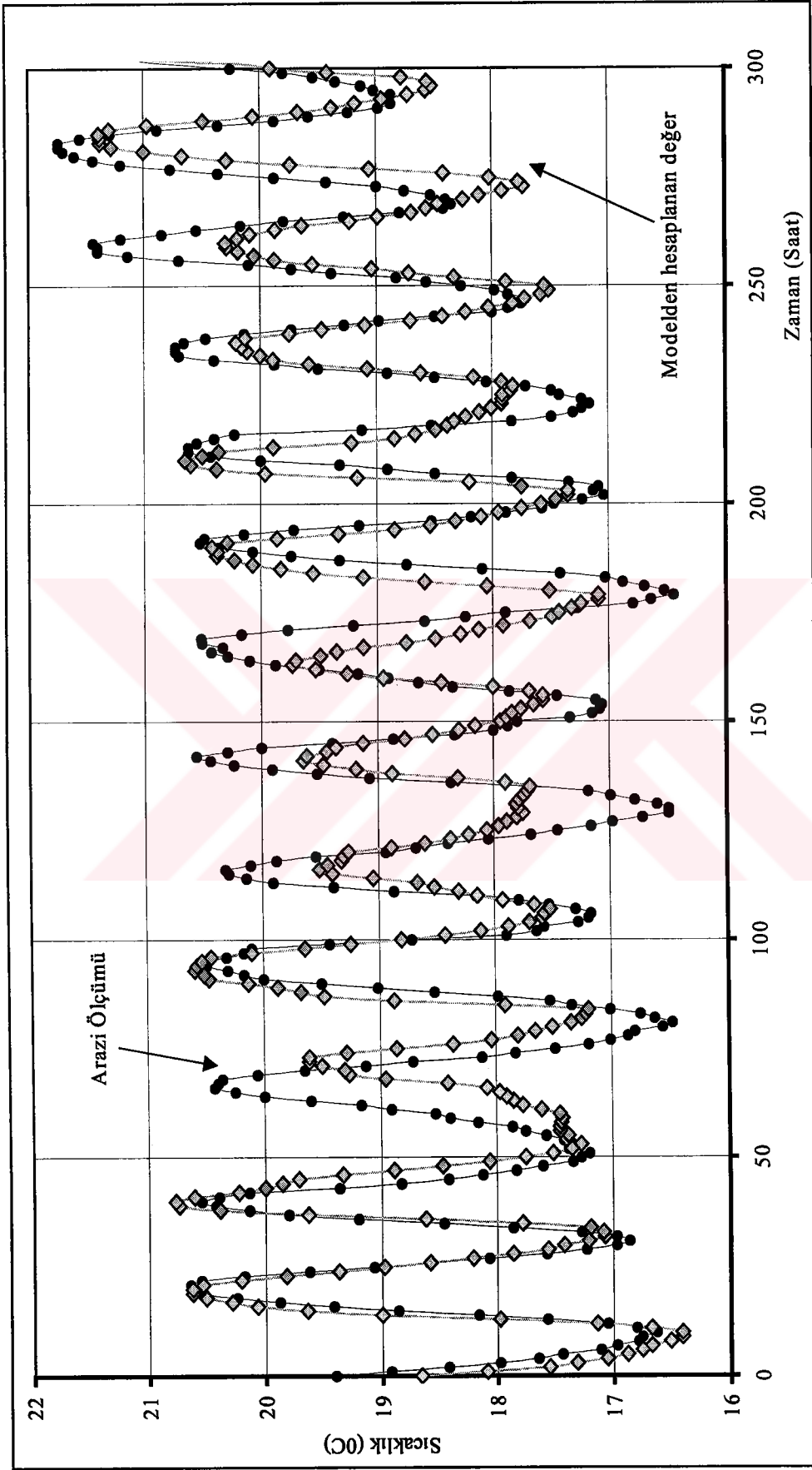
Üstel değerler arttıkça fonksiyonun  $R^2$  değeri de artmaktadır. Elde edilen model ile arazide ölçülen değerler arasındaki  $T_1$ 'e ait grafik Şekil 5.1'de verilmektedir. Bu grafiğin net olarak görülmesi için 300 saate ait gösterim Şekil 5.2'de verilmiştir. Diğer bütün istasyon noktalarına ait grafikler EK-C de verilmektedir.  $T_1$ 'e uygulanan istatistiksel model sonucunda elde edilen katsayıları gösteren Çizelge 5.1'de verilmektedir. Diğer bütün istasyon noktalarına ait katsayılar EK-D'de verilmektedir.

Çizelge 5.1. Modelden elde edilen T1'e ait katsayılar

Parametre	Değerler	Parametre	Değerler
A	3,041057520	L	1,000000000
C	1,20724E+17	M	1,000000000
Ç	-1,49075E+16	O	-1,162247719
D	9,44264E+14	Ö	78012492,155
E	-3,15449E+13	P	172289,04396
F	531915691862	R	-9164,701009
G	-3571553693	Ş	1,000000000
Ğ	8,16780E+13	U	0,999999519
H	-2,38840E+11	Ü	475303572,04
J	1280309184,7	V	-441843,7592
I	-2177309,641	Y	-100,4169656
İ	1429,2273855	Z	0,127460569
K	-0,325049998		



Şekil 5.1. T1'e ait arazi ölçümleri ve istatistiksel modelden hesaplanan yağın içi sıcaklık değerleri



Şekil 5.2. T1'e ait arazi ölçümleri ve istatistiksel modelden hesaplanan değerlerin ilk 300 saate göre grafikleri.

## 5.2. Sonlu Elemanlar Yöntemi ve Isı Transferine Uygulanışı

DeneySEL çalışmalar, fiziki ortamın sürekli sağlanamaması, deney aygıtlarının pahalı olması ve yeterli finans desteğin temininde güçlük gibi nedenlerle her zaman mümkün olmamaktadır. Günümüzde gelişen bilgisayar teknolojisi ve buna bağlı olarak kapasitesi artan paket programlar, deneySEL çalışmaların yerini almaktadır. Bu çalışmada, kömür yığını içerisindeki sıcaklık dağılımının deneySEL çalışması yapılmış ve aynı koşullar bilgisayar ortamına uyarlanarak benzer sonuçların elde edilmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla, stoklardaki kömür yığınlarının iki boyutlu çözümlü yapılmıştır. Düzgün geometrik şekillere sahip olmayan şekillerin incelenmesinde, Sonlu Elemanlar Metodu (SEM) problemin çözümlünün karmaşıklığını ortadan kaldırdığı ve uygulama kolaylığı sağladığından dolayı bu çalışmada da kullanılmıştır.

Sonlu Elemanlar Metodu, geniş bir alanda uygulanabilmektedir. Bu nedenle birçok yapısal ve mekanik problemlerin çözümlü için çeşitli paket programlar geliştirilmiştir. ANSYS sonlu elemanlar analiz programı Dr. John Swanson tarafından 1970'li yıllarda geliştirilmiş ve mühendislik bilimlerinin her alanında kullanılan genel bir paket program haline gelmiştir. Programın popüler olmasının sebebi, genel amaçlı bir program olması, her türlü dijital bilgisayar ortamında çalışabilmesi, temininin kolay ve fiyatının uygun olmasıdır.

Programın kullanıldığı alanlar; statik ve dinamik yapı analizleri, statik ve dinamik kinematik analizler, termal analizler, elektromagnetik alan analizleri, akışkan akışı analizleri, elektrik alan analizleri, akustik analizleri, aynı zamanda birleştirilmiş alan analizleri (yapı + ısı + elektrik, ısı + manyetizma, ısı + elektrik vb.), optimizasyon, yapı burkulma analizleri örnek olarak sayılabilir (Berber, 2002).

### 5.2.1. Programın kullanılması

Bu çalışmada sonlu elemanlar analizi yapan bir paket program kullanılmıştır. Bu programda, çözümlerin elde edilmesi, üç aşamada gerçekleşmektedir;

- 1-Ön işlem (Preprocessing),
- 2-İşlem (Processing) ve
- 3-Son işlem (Postprocessing).

İlk aşama, çözüm için gerekli olan verilerin oluşturulmasını kapsar. Önce koordinat sisteminin seçimi, eleman tipinin belirlenmesi, malzeme özelliklerinin belirlenmesi, katı modelin oluşturulması ve sonlu elemanlara ayrılması işlemi yapılır.

Daha sonra çözüme geçilir. Bu aşamada analiz tipi, analiz opsiyonları, yükleme durumları ve sonlu eleman çözüm tekniği belirlenir. Oluşturulan katı model üzerinde yükleme durumları, sınır şartları ve serbestlik dereceleri belirlenir.

ANSYS programının çok geniş bir eleman kütüphanesi vardır. Bu eleman kütüphanesi, sıradan elemanların ve izoparametrik tip elemanların her ikisini de kapsar. Eleman malzeme özellikleri, izotropik veya ortotropik seçilebilir. Ortotropik malzemenin yerleşiminin verilen eleman içinde sabit olduğu kabul edilir. Malzeme özelliklerinin, sıcaklıkla dördüncü mertebeye kadar bir polinomla ifade edilmesine izin verilir.

Genellikle doğrusal yük - deformasyon denklemlerinin çözümü, sonlu eleman analizinde bilgisayar tarafından harcanan zamanın en büyük kısmını kapsar. Bu denklemleri çözüme yöntemi ve verilerin kayıt edilmesi ve çözüm sırasında tekrar kullanılmak için çağırılması, çözüm zamanında büyük bir etkiye sahiptir. Elemanlar, önceden kendilerine atanmış eleman numaralarından daha çok, veri girişi sırasında kendilerine verilen sırada işlenirler. En büyük bant genişliğini en aza indirmek için elemanların sırasının tekrar düzenlenmesi, veri girişinde çok basit değişiklikleri gerektirir ve çok kolaydır.



ANSYS'de uygun eleman alanlarını, düğüm noktalarını, sonlu elemanları, malzeme özelliklerini modele uygulamak için eleman ağı üretme modülü kullanılır. Eleman ağı, alanları oluşturulurken serbest veya haritalanmış eleman ağı tipi, eleman tipi ve eleman ağı alanlarının sınırları boyunca sayısı, polinom mertebesi, elemanların fiziki ve malzeme özellikleri belirtilir. Bütün elemanların mekanik ve fiziki özellikleri bir veya daha fazla eleman tarafından ortak kullanılabilen özellik çizelgelerine bir numara ile atanır.

Programın 2. kısmı olan işleme aşaması, SOL modülü kullanılarak yapılır. Çözüm için giriş verileri, düğüm noktaları, elemanlar, malzeme ve fiziki özellikler ön işleme bölümünde, yükler, yer değiştirme ve serbestlik derecesi sınırlamaları gibi yükleme durumları işleme bölümünde verilerek çözümler yapılır.

3. aşama olan son işlemede, ANSYS sonuçların değişik şekillerde alınabilmesine imkan verir. Elde edilen sonuçlar, doğrudan veya bir veri tabanına yüklenerek alınabilir. Çeşitli ileri çizim tipleri elde edilebilir.

### **5.3. Kömür Yığınının Sıcaklık Dağılımının Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Bulunması**

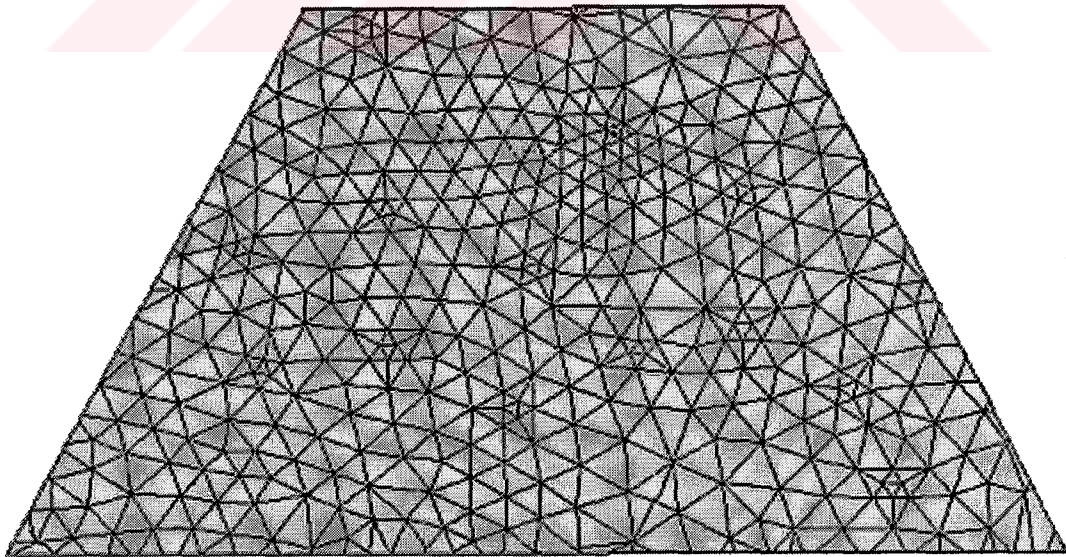
#### **5.3.1. Katı modelleme ve ağ üretimi**

Kömür yığınının modellenmesine, aksel simetrik tel kafes yapının oluşturulması ile başlanılmıştır. Bu yapı oluşturulurken, ilk önce yığının ham katı modeli elde edilmiştir. Bundan sonra yapılacak işlemler için, bu katı model esas olarak alınır. Elde edilen katı modelin içine hava tanecikleri eklenerek, kömür yığınının gerçek şekline mümkün olduğu kadar yakın bir katı model oluşturulmuştur.

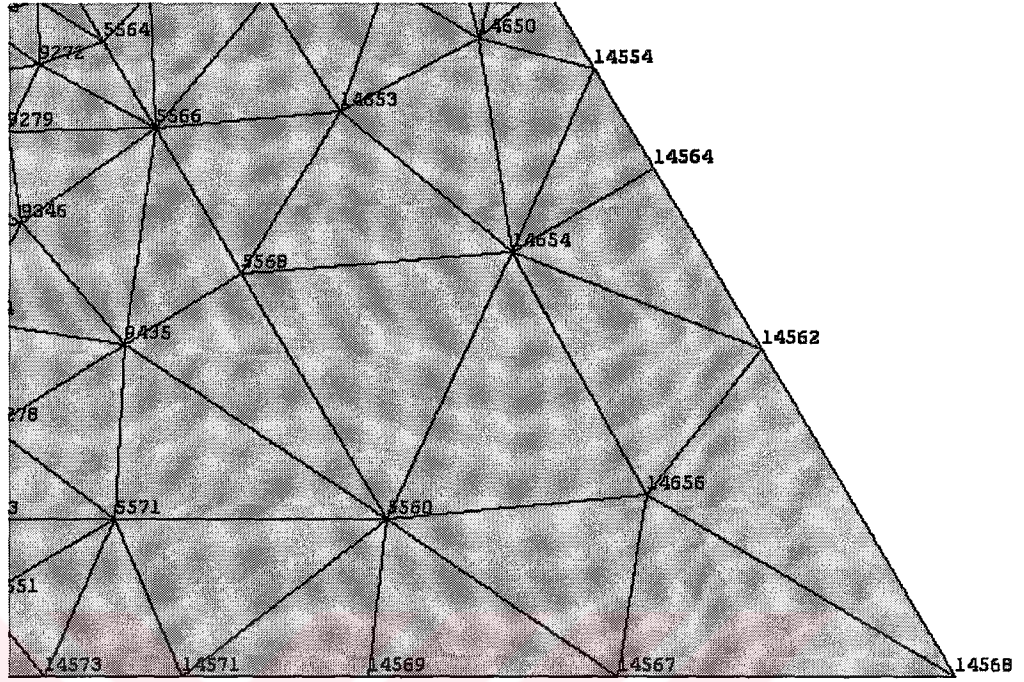
Modeli oluşturulan kömür yığınının boyutları, stok sahasında oluşturulan gerçek yığın boyutları ile (eni 5 m, yüksekliği 3 m) aynı alınmıştır. Gerçek

yığın, 18-50 mm boyutunda kömür tanelerinden ve hava boşluklarından oluştuğu için ve iri taneler kenarlarda biraz daha fazlaca toplandığı için aynı durum baz alınarak model içine çok sayıda hava ve kömür taneleri yerleştirilmiştir. Modeldeki bütün kömür tanelerinin şekli, farklı geometrilerde alınmıştır.

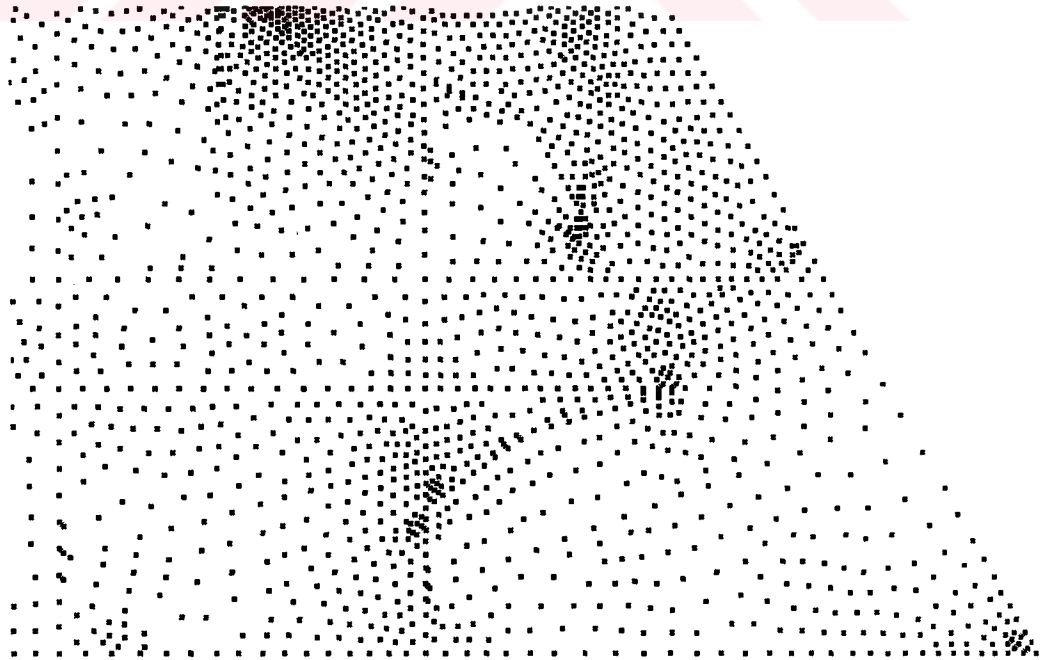
Ağ, sonlu elemanların üzerinde oluşturulacağı bölgelerdir. Serbest ağ yapısı ise otomatik olarak programın oluşturacağı bir ağ yapısıdır. Diğer ağ yapılarına göre karmaşık şekillere ve yüzeylere uygulanabilmesi açısından daha güçlüdür. Analizi yapılan sistemin ağ oluşumu, serbest ağ yapısı kullanılarak yapılmış ve Şekil 5.3'de verilmiştir. Oluşturulan bu modelin en fazla eleman sayısı 26.477 (bu durumu gösteren şekil modelin sağ alt köşesi büyütülerek Şekil 5.4'de verilmiştir) olup, en fazla düğüm sayısı 53.664 (bu durumu gösteren şekil modelin sağ alt köşesi büyütülerek Şekil 5.5'de verilmiştir)'tür. Bu modele ait sonlu elemanlar programının log değerleri EK-E'dedir.



Şekil 5.3. Ansys program için kömür yığınının katı modellenmesi ve ağ üretimi



Şekil 5.4. Modelin eleman sayılarını gösteren kesit



Şekil 5.5. Modelin düğümlü durumunu gösteren kesit

### 5.3.2. Sonlu elemanlar çözümü

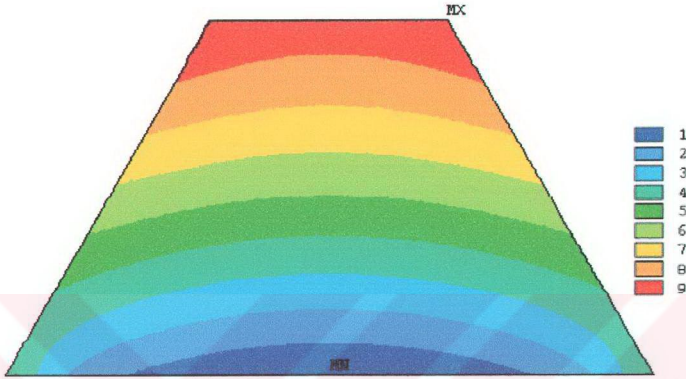
Modelde oluşturulan hava, çakıllı toprak ve kömür tanelerinin malzeme özellikleri aşağıdaki Çizelge 5.2’de verilmiştir (Shartley and Williams, 1965; Kakaç, 1998).

Çizelge 5.2. Hava, kömür ve çakıllı toprağın özellikleri (Shartley and Williams, 1965; Kakaç, 1998).

	Hava	Kömür	Çakıllı toprak
$\rho$ =Yoğunluk (kg/m <sup>3</sup> )	1.2045	1.60	2.050
$\nu_{xx}$ =Poisson oranı	0	0.4	0.5
$K_{xx}$ =Isı iletim katsayısı (W/m <sup>2</sup> °C)	0.0257	0.142	1.83
$C$ =Özgül ısı (kJ/kg°C)	0.24	1.50696	1.842

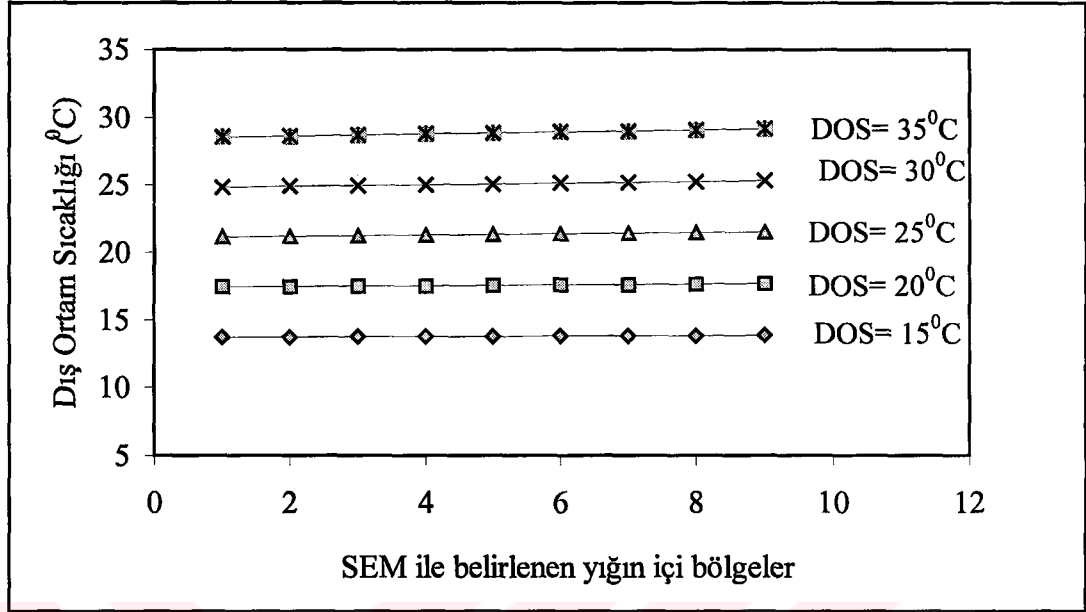
Oluşturulan modelin hava ile temas halinde olan üç yüzeyinin de eşit sıcaklığa maruz kaldığı düşünülerek analiz yapılmıştır. Dış ortam sıcaklıkları (DOS) 15°C’den başlayıp, 35°C’ye kadar, 5’er °C artırılarak çözüm yapılmıştır. Modelde malzeme özellikleri sabit alındığından, sıcaklık dağılımı profilleri aynı kalmaktadır (Şekil 5.6). Bu modele ait 15°C için programın Log değerleri EK-E’de verilmektedir.



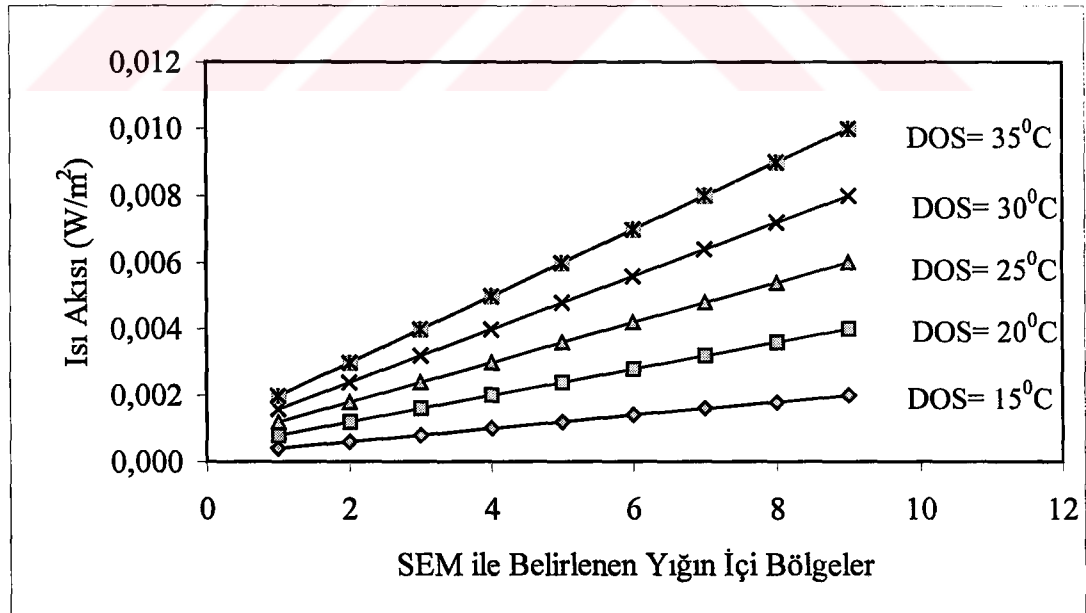


Şekil 5.6. Dış ortam sıcaklığının sabit olması durumunda modelde oluşan sıcaklık profilleri

Sıcaklık dağılımı, DOS 15°C alındığında en düşük 1. bölgede 13.711°C ve en yüksek olan 9. bölgede 0.015°C'lik artışlarla 13.831°C olarak görülmektedir. DOS 20°C alındığında en düşük 1. bölgede 17.423°C ve en yüksek olan 9. bölgede 0.030°C'lik artışlarla 17.663°C olarak görülmektedir. DOS 25°C alındığında en düşük 1. bölgede 21.134°C ve en yüksek olan 9. bölgede 0.045°C'lik artışlarla 21.494°C olarak görülmektedir. DOS 30°C alındığında en düşük 1. bölgede 24.846°C ve en yüksek olan 9. bölgede 0.060°C'lik artışlarla 25.326°C olarak görülmektedir. DOS 35°C alındığında ise en düşük 1. bölgede 28.557°C ve en yüksek olan 9. bölgede 0.075°C'lik artışlarla 29.157°C olarak görülmektedir. Bu değerleri gösteren grafik Şekil 5.7'de görülmektedir.



a)



b)

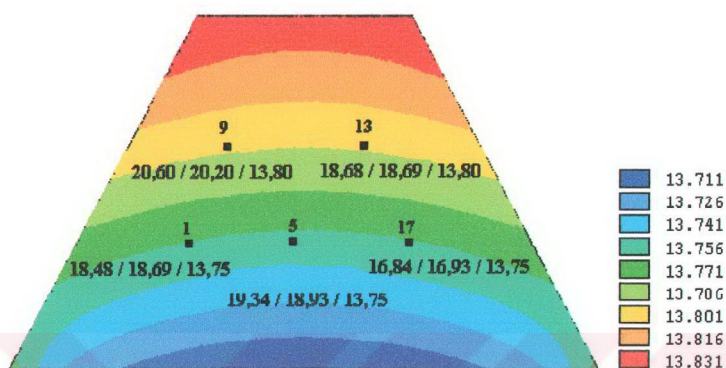
Şekil 5.7. Ansys paket program yardımıyla modelde belirlenen 9 ayrı bölgedeki sıcaklıklara ait, a) Sıcaklık dağılımı, b) Sıcaklık akısı

Ortam sıcaklıklarının artması veya eksilmesi durumunda yığın içi sıcaklıklar da orantılı olarak artmakta veya azalmaktadır. Gerçek yığın ölçüm verilerinde de kenarlara yakın noktalarda sıcaklıklar yüksek, merkeze doğru yaklaştıkça azalmaktadır. Bu durum modelimize de uygunluk göstermektedir.

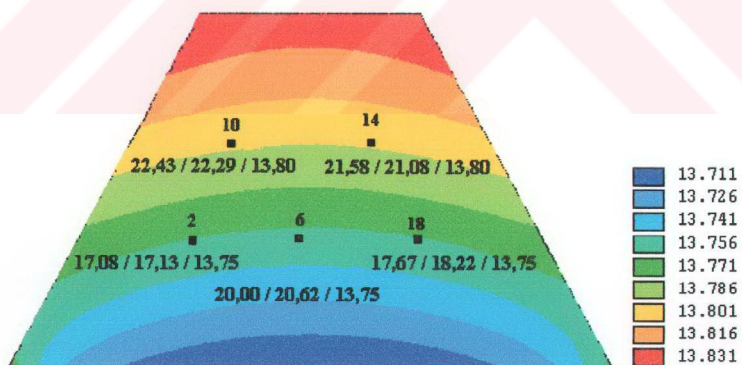
#### **5.4. Arazi Ölçümleri ile Diğer Modellerin Karşılaştırılması**

Ansys programı yardımıyla elde edilen sıcaklık değerleri, yığının zaman içinde ulaştığı son sıcaklık durumunu göstermektedir. Bundan dolayı bu çalışmada geliştirilen matematiksel modelin sınırlarının belirlenmesinde, yığın sıcaklığının ulaştığı son sıcaklık durumları göz önüne alınmıştır. Bu çerçevede istatistiksel model için girdi verileri de bu sıcaklık için seçilerek hesaplanmıştır.

Bu amaçla kömür yığınının 4 adet kesit çıkarılmıştır. Kesitler arası (bkz. Şekil 4.9a) mesafe 2 m'dir. Kesitler üzerinde veriler, Arazi Ölçümü / İstatistiksel Model / Ansys Model formatında hazırlanarak, dış ortam sıcaklığı 15 °C için Şekil 5.8'de verilmiştir. DOS 20 °C için Çizelge 5.3'de, DOS 25 °C için Çizelge 5.4'de, DOS 30 °C için Çizelge 5.5'de ve DOS 35 °C için Çizelge 5.6'da ayrı ayrı verilmiştir.

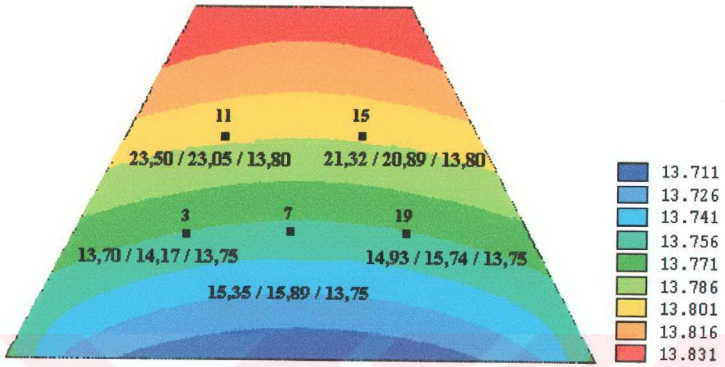


a)

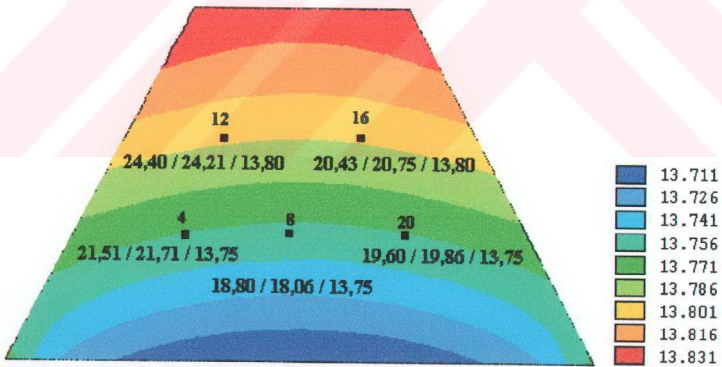


b)





c)



d)

Şekil 5.8. Dış ortam sıcaklığı 15°C için kesitte sıcaklıkların karşılaştırılması, a) AA' kesitinde sıcaklık değerleri, b) BB' kesitinde sıcaklık değerleri, c) CC' kesitinde sıcaklık değerleri, d) DD' kesitinde sıcaklık değerleri

Çizelge 5.3. DOS 20 °C için sıcaklıkların karşılaştırılması

Kesit	İstasyon No	Arazi Ölçümü	İstatistiksel Model	Ansys Model	İstasyon No	Arazi Ölçümü	İstatistiksel Model	Ansys Model
		Yükseklik = 1 m				Yükseklik = 2 m		
AA'	1	20,13	20,22	17,51	9	21,78	21,70	17,60
	5	19,45	20,42	17,51	13	20,49	20,34	17,60
	17	18,17	18,46	17,51				
BB'	2	18,73	18,66	17,51	10	24,32	23,69	17,60
	6	23,42	22,11	17,51	14	23,35	22,90	17,60
	18	20,34	19,66	17,51				
CC'	3	15,46	15,61	17,51	11	25,20	24,73	17,60
	7	18,00	17,32	17,51	15	23,13	22,61	17,60
	19	17,05	17,14	17,51				
DD'	4	23,34	23,37	17,51	12	25,13	25,85	17,60
	8	20,23	20,28	17,51	16	21,87	22,26	17,60
	20	21,83	21,13	17,51				

Çizelge 5.4. DOS 25 °C için sıcaklıkların karşılaştırılması

Kesit	İstasyon No	Arazi Ölçümü	İstatistiksel Model	Ansys Model	İstasyon No	Arazi Ölçümü	İstatistiksel Model	Ansys Model
		Yükseklik = 1 m				Yükseklik = 2 m		
AA'	1	21,48	20,97	21,31	9	23,13	22,93	21,40
	5	21,05	21,16	21,31	13	21,73	21,22	21,40
	17	19,44	19,27	21,31				
BB'	2	20,08	19,47	21,31	10	24,93	24,25	21,40
	6	23,09	22,87	21,31	14	24,62	23,71	21,40
	18	20,99	20,51	21,31				
CC'	3	16,77	16,15	21,31	11	26,19	25,71	21,40
	7	18,76	18,30	21,31	15	24,13	23,55	21,40
	19	18,10	17,85	21,31				
DD'	4	24,75	23,96	21,31	12	26,40	26,39	21,40
	8	21,23	20,99	21,31	16	23,08	23,24	21,40
	20	22,30	21,97	21,31				

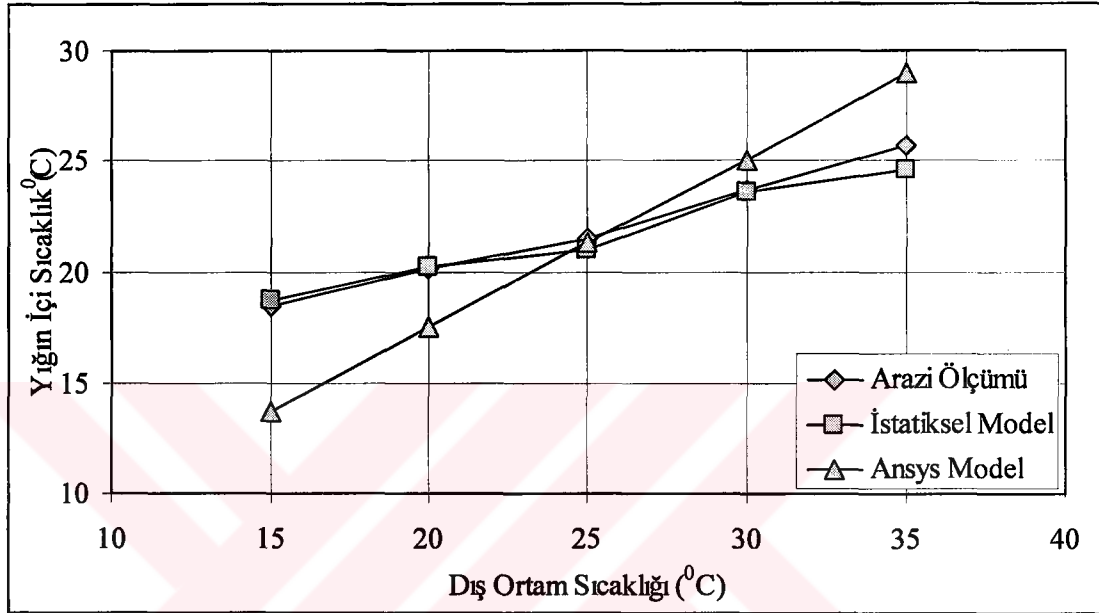
Çizelge 5.5. DOS 30 °C için sıcaklıkların karşılaştırılması

Kesit	İstasyon No	Arazi Ölçümü	İstatistiksel Model	Ansys Model	İstasyon No	Arazi Ölçümü	İstatistiksel Model	Ansys Model
		Yükseklik = 1 m				Yükseklik = 2 m		
AA'	1	23,71	23,60	25,02	9	23,77	23,83	25,20
	5	19,72	21,97	25,02	13	23,53	23,93	25,20
	17	21,14	21,72	25,02				
BB'	2	22,52	22,15	25,02	10	22,12	24,38	25,20
	6	23,60	23,62	25,02	14	26,30	26,65	25,20
	18	22,25	22,53	25,02				
CC'	3	18,08	18,35	25,02	11	28,42	28,10	25,20
	7	19,49	19,58	25,02	15	26,00	26,39	25,20
	19	19,55	19,98	25,02				
DD'	4	26,09	26,24	25,02	12	28,02	28,17	25,20
	8	20,32	21,91	25,02	16	23,98	24,03	25,20
	20	23,45	23,59	25,02				

Çizelge 5.6. DOS 35 °C için sıcaklıkların karşılaştırılması

Kesit	İstasyon No	Arazi Ölçümü	İstatistiksel Model	Ansys Model	İstasyon No	Arazi Ölçümü	İstatistiksel Model	Ansys Model
		Yükseklik = 1 m				Yükseklik = 2 m		
AA'	1	25,68	24,56	29,00	9	24,18	23,94	28,78
	5	23,22	22,74	29,00	13	25,05	24,85	28,78
	17	23,27	22,70	29,00				
BB'	2	24,28	23,11	29,00	10	25,65	25,34	28,78
	6	24,52	24,25	29,00	14	27,62	26,96	28,78
	18	24,08	23,42	29,00				
CC'	3	19,27	18,91	29,00	11	28,24	28,07	28,78
	7	20,62	20,15	29,00	15	27,54	26,77	28,78
	19	21,38	20,54	29,00				
DD'	4	27,43	26,44	29,00	12	28,35	28,41	28,78
	8	22,92	22,29	29,00	16	26,23	25,44	28,78
	20	25,28	24,63	29,00				

Yukarıda elde edilen Şekil 5.8 ve Çizelge 5.3, 5.4, 5.5 ve 5.6'dan, T1'e ait DOS 15, 20, 25, 30 ve 35 °C için grafiksel analizler yapılmıştır. Bu analizlere ait tipik bir örnek aşağıda Şekil 5.9 'da verilmektedir.



Şekil 5.9. T1'e ait DOS-Yığın içi sıcaklık grafiği.

Şekil 5.9'dan görüldüğü üzere T1 istasyon noktasına ait Arazi ölçüm, İstatistiksel model ve Ansys model değerleri DOS 25 °C için büyük oranda uygunluk göstermektedir. Diğer istasyon noktaları olan T2, T4, T5, T6, T8, T9, T10, T13, T14, T15, T16, T17, T18 ve T20'de de 25 °C için aynı başarı sergilenmektedir. Ancak bu durum T11 ve T12 istasyon noktalarında 35 °C için, T3, T7 ve T19 istasyon noktalarında ise 15 °C için uygunluk göstermektedir.

Yukarıda bahsedilen analizler neticesinde geliştirilen matematiksel modelin DOS 25-30 °C arasında iken doğruya yakın sonuçlar ürettiği belirlenmiştir.

### 5.5. Kömür Yığınının Sıcaklık Haritasının Çıkarılması

Burada asıl amaç, yığın içerisindeki değişimleri görsel olarak ifade edebilmek ve sıcaklık değişimlerinin zaman, nem, rüzgar hızı ve yönü, atmosfer basıncı ve sıcaklık faktörleri ile ilişkilerinin belirlenmesidir. Yığın içerisinde istenen bir değişimin 2 veya 3 boyutlu olarak gösterimi, yığına gelen güneş ışınlarının açısı, günün gündüz/gece halleri, nem v.b değişkenlerle ilişkisini daha kolay belirlemede en büyük yardımcı veri olacaktır. Diğer taraftan, tematik anlamda yığın durumunun gösterimi, pratikte işletmecilerin kritik birtakım çabuk kararlar vermesine yardımcı olacaktır. Alınan bu kararlarla, daha sonraki oluşturulacak yığının konumu (yönü), yüksekliği, güneşe göre pozisyonu, bölgenin genel rüzgar yönlerine göre oluşturulması daha bilinçli olarak gerçekleştirilecektir.

Yığın içinde sıcaklık artışının olması, orada bir oksidasyon olayının göstergesidir. Oluşan sıcaklık etrafa yayılmaktadır. Böylece yığın içinde sıcaklık ölçümleri sonucunda, oluşan ısı kaynaklarının nasıl ve nerelerde meydana geldiği görülmektedir. Sıcaklığın nasıl bir yayılım gösterdiği sayısal model ile de değerlendirilmektedir. Bu model, sıcaklık değerleri ile sıcaklık ölçüm noktalarının belli bir koordinat sisteminde gösterilmesi ile oluşturulmuştur. Elde edilen sayısal model ile yığının herhangi bir noktası içinde istenen sıcaklık değerler enterpolasyon yoluyla okunabilir.

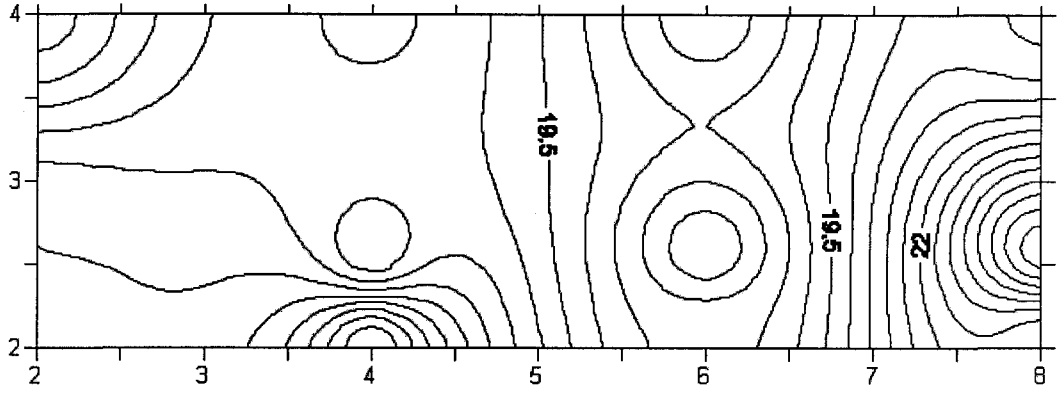
Yapılan bu çalışma ile kömür yığını içerisindeki sıcaklık değişimleri, görsel olarak ifade edilmiştir. Pt100'lerin yığın içerisinde belli bir düzene göre yerleştirilmiş olması, sensörlerden alınan bilgiye göre, yığın içerisindeki değişimin hatasız incelenmesi için ön şarttır. Sensör konumlarının, yığın içinde belli bir koordinat sisteminde olması gerekir. Yığın kısa kenarı X, buna dik olarak uzun kenar boyunca Y eksenini olarak kabul edilen bir dik koordinat sisteminde değerlendirilecektir. T1, T2, ....., T20 sensörleri homojen dağılımı temsil edecek şekilde yığın içine yerleştirilmiştir. Bu koordinatlara ait bilgi aşağıda Çizelge 5.7'de görülmektedir.

Çizelge 5.7. Sensörlerin koordinat sistemindeki yeri, a) Zeminden 1 m yükseklik, b) Zeminden 2 m yükseklik

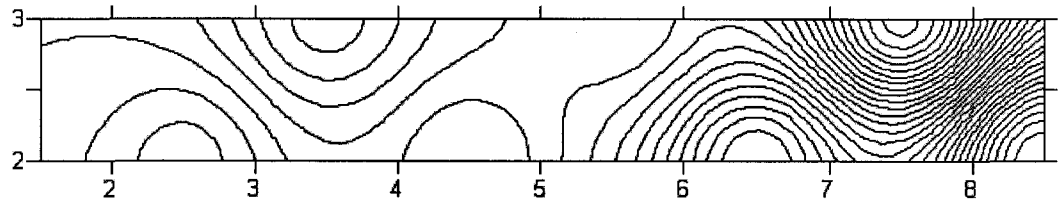
a)			b)		
Sensörler	X (m)	Y (m)	Sensörler	X (m)	Y (m)
T1	2.25	10.00	T9	3.00	9.00
T2	2.25	7.50	T10	3.00	6.50
T3	2.25	5.00	T11	3.00	4.00
T4	2.25	2.50	T12	3.00	1.50
T5	3.50	10.00	T13	4.00	11.00
T6	3.50	7.50	T14	4.00	8.50
T7	3.50	5.00	T15	4.00	6.00
T8	3.50	2.50	T16	4.00	3.50
T17	4.75	10.00			
T18	4.75	7.50			
T19	4.75	5.00			
T20	4.75	2.50			

Yukarıda anlatılanlar ışığında adı geçen tabloda en kritik ve doğru bilgileri yansıtabilecek satırların veya ortalamaların seçilmesi gerekir. Konumsal değişim haritası için, incelenecek değişken plana Z koordinatı olarak girilecektir. Burada asıl amaç kömürün kendiliğinden yanmasının araştırılması olduğuna göre, sensörlerdeki sıcaklık değişimleri Z parametresi olarak değerlendirilebilir. 1719 satırdaki bilgi, her değişken için kendi arasında bir pratik gösterim ile değerlendirilerek uç noktalar belirlenir. Böylelikle en fazla verinin değerleri arasındaki sıcaklık, yığın içerisindeki konumsal değişimi enterpolasyon yöntemiyle gösterilecektir. Aksi halde her satır için 1719 kez bu yığının gösteriminin çizilmesi mümkündür. Bu amaçla alınan hava sıcaklık değerlerinin en yüksek sıcaklık değeri olan 1102 saat değerinin, en uygun bilgiyi içerdiği görülmüştür. Topoğrafik haritaların oluşturma esaslarında olduğu gibi T'lerin X ve Y koordinatlarının yanında ilgili satırdaki Z (sıcaklık) değerleri ek alınarak, Şekil 5.10'da görülen gösterimler oluşturulmuştur.

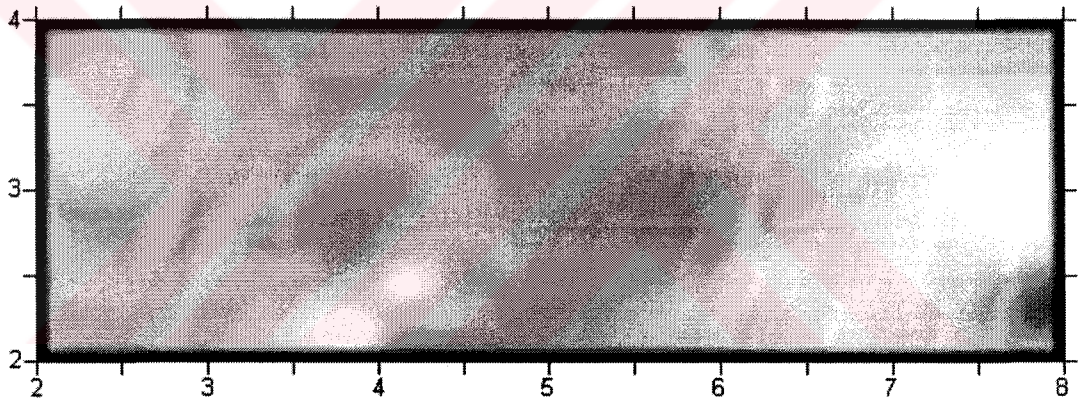




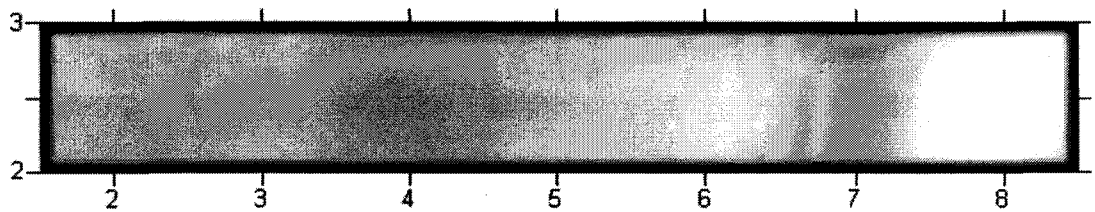
a)



b)



c)

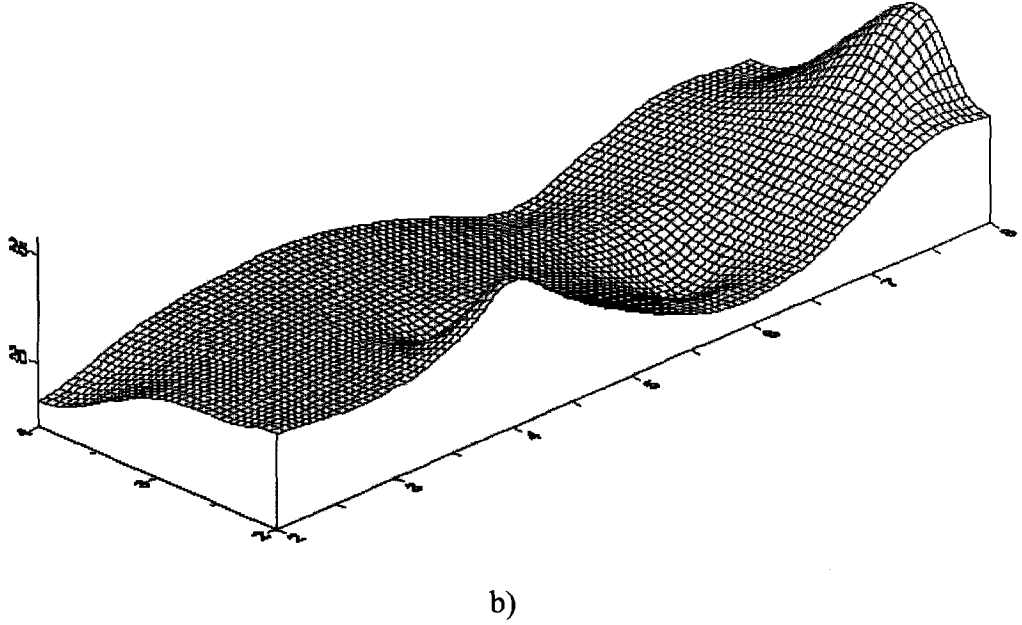
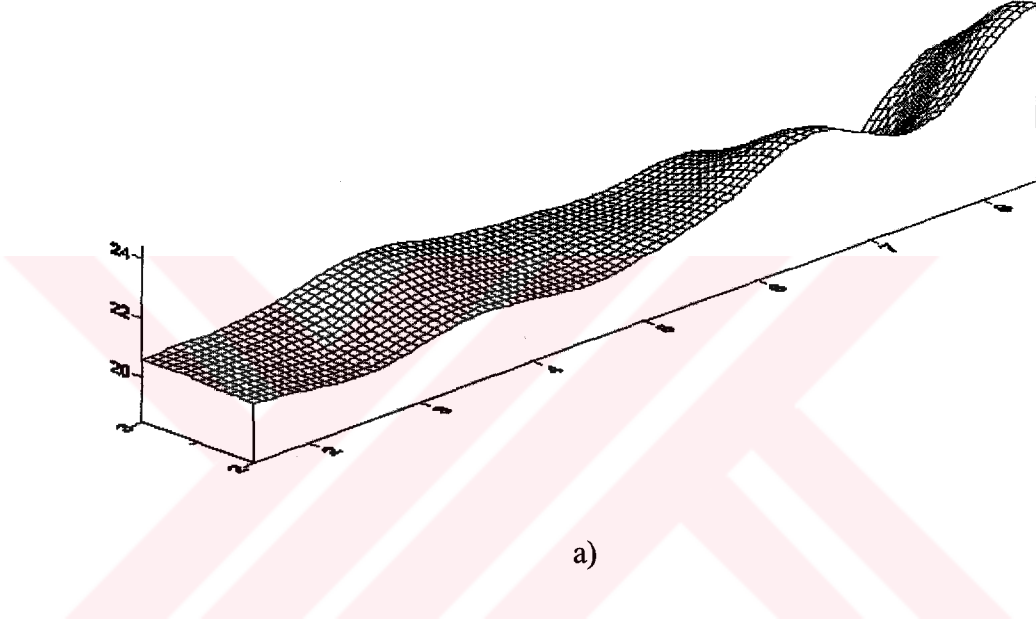


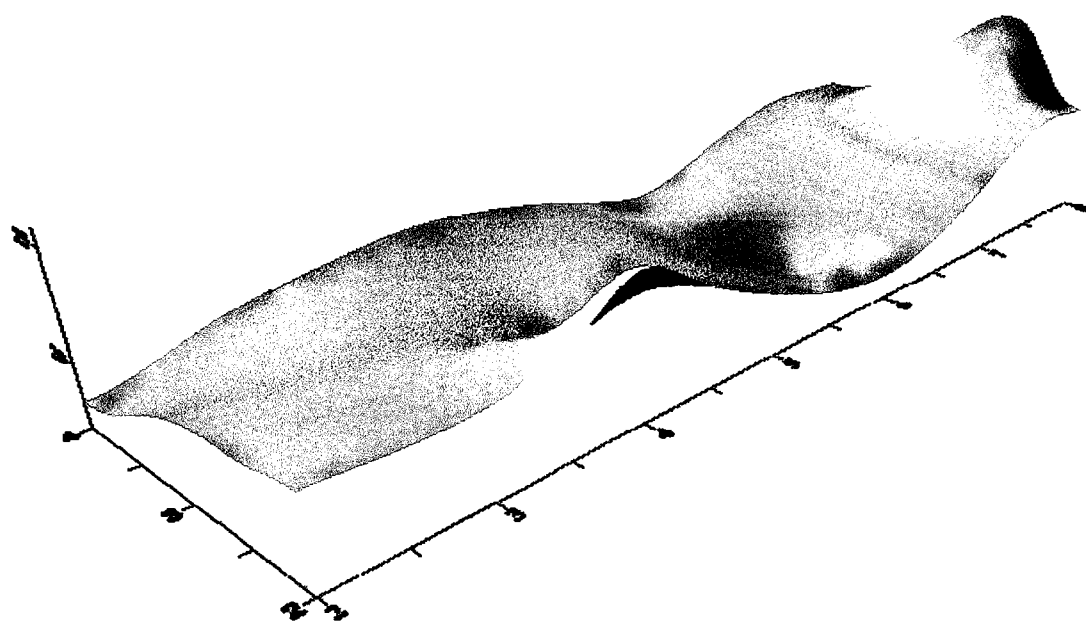
d)

Şekil 5.10. Yiğinin sıcaklık haritası, a) Zeminden 1 m ve b) Zeminden 2 m yükseklikteki sıcaklık dağılımının eş sıcaklık eğrileri ile gösterimi, c) Zeminden 1 m ve d) Zeminden 2 m'deki sıcaklık dağılımının gri tonlarla gösterimi

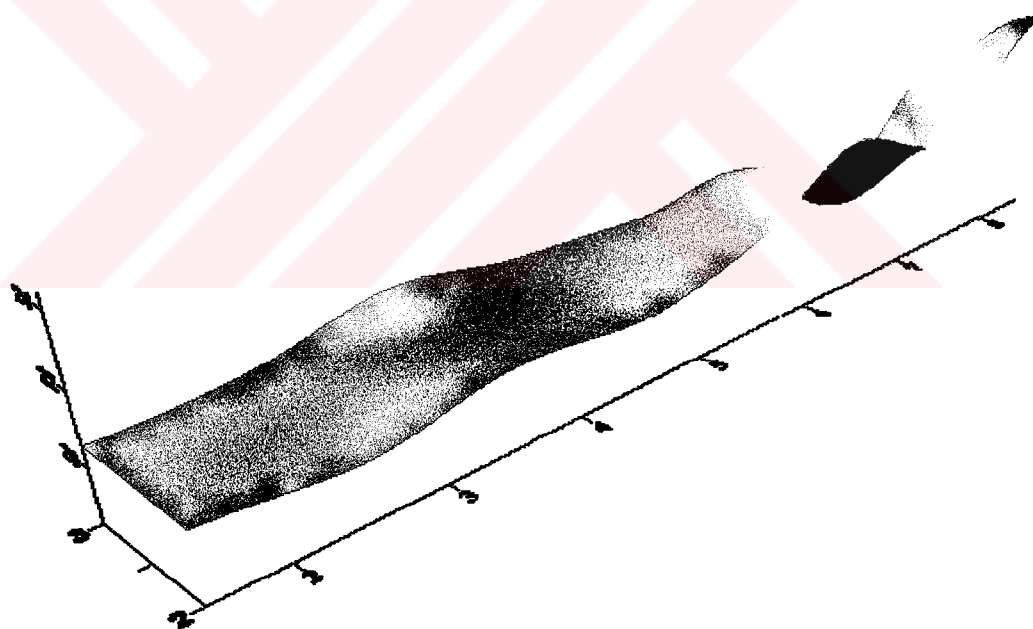


Eşsıcaklık eğrileri “inverse distance to a power” enterpolasyon yöntemiyle homojen gridler alınarak, SURFER 8 (Golden Software, Inc.) programı ile otomatik olarak çizilmiştir. Eşsıcaklık eğrilerinin okunması ile aslında okuma yapılmamış yığın üzerindeki her noktaya ait sıcaklık değişimleri ve bunların farklı zamanlardaki konumsal değişimleri gösterilmiştir. Böylece, yığın sıcaklık dağılımı en doğru şekilde temsil edilecektir. Şekil 5.11’de sıcaklık dağılımının çeşitli üç boyutlu gösterimleri verilmektedir.

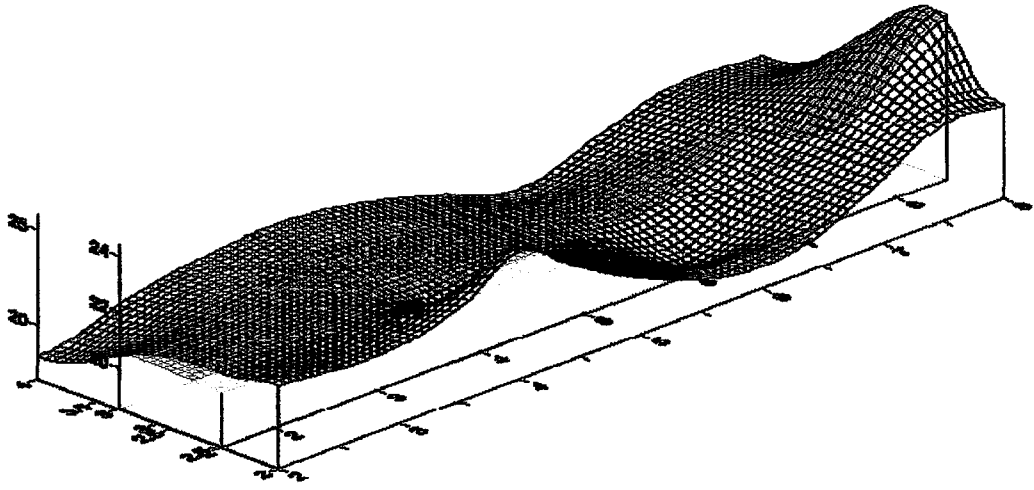




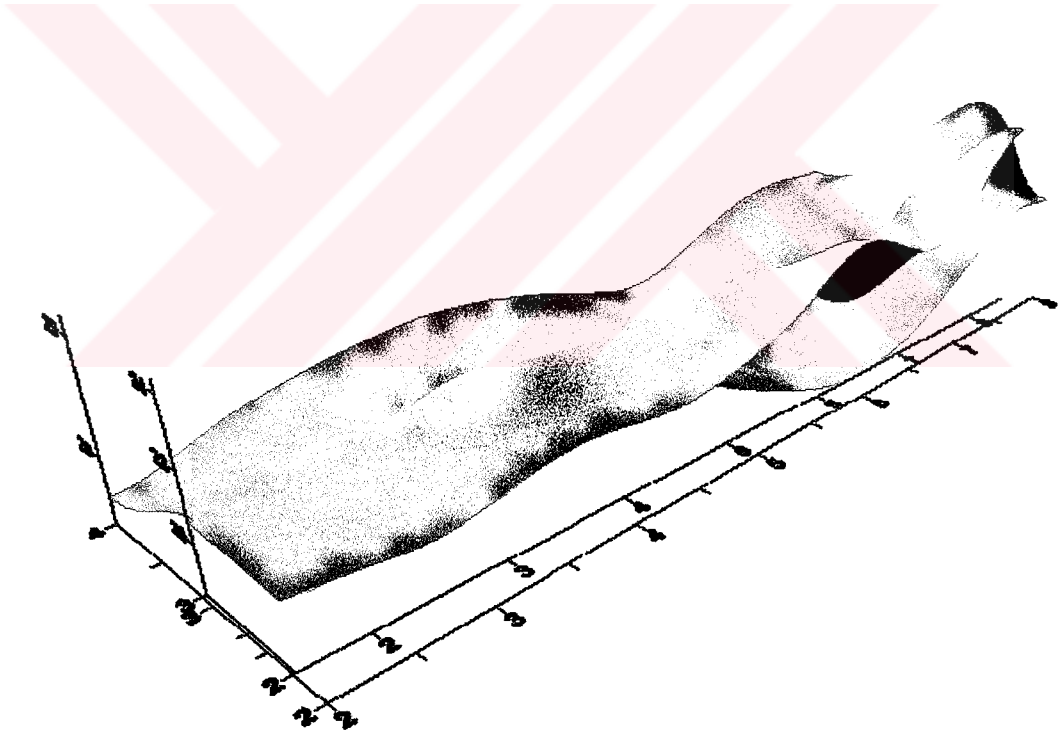
c)



d)

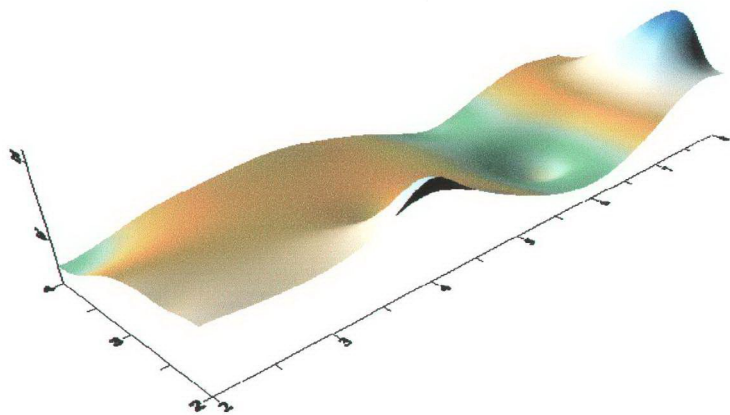


e)

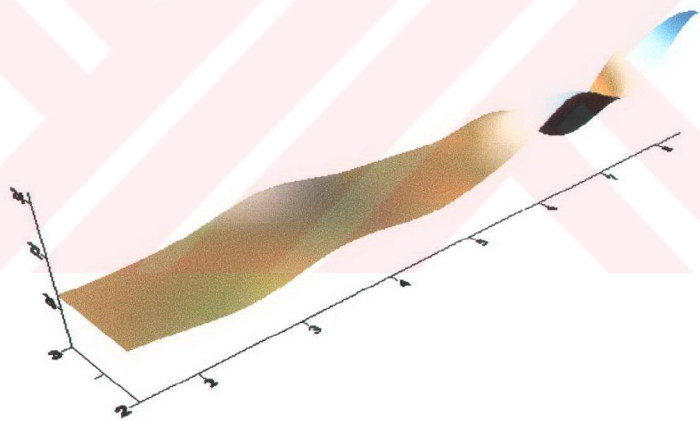


f)

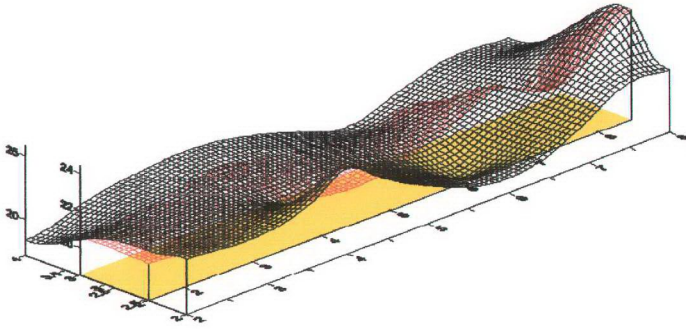
Şekil 5.11. Yıgın içindeki sıcaklık dağılımının, a) Zeminden 1 m ve b) Zeminden 2 m'deki perspektif olarak gösterimi; c) Zeminden 1 m ve d) Zeminden 2 m'deki renklerle gösterim; e) Zeminden 1 m ve 2 m'deki perspektif görüşlerin üst üste çakıştırılarak gösterimi, f) Zeminden 1 m ve 2 m'deki renkli görüşlerin üst üste çakıştırılarak gösterimi



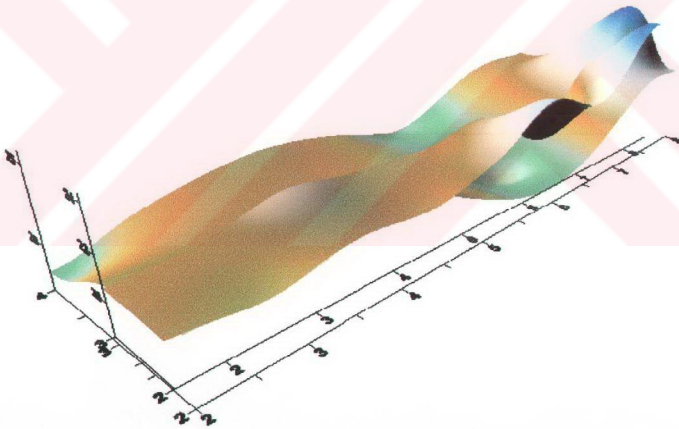
c)



d)



e)



f)

Şekil 5.11. Yığın içindeki sıcaklık dağılımının, a) Zeminden 1 m ve b) Zeminden 2 m'deki perspektif olarak gösterimi; c) Zeminden 1 m ve d) Zeminden 2 m'deki renklerle gösterim; e) Zeminden 1 m ve 2 m'deki perspektif görüntülerin üst üste çakıştırılarak gösterimi, f) Zeminden 1 m ve 2 m'deki renkli görüntülerin üst üste çakıştırılarak gösterimi

## 6. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

### 6.1. Sonuçlar

Sunulan bu çalışmada, yığın halinde stoklanan kömürlerin kendiliğinden yanması olayı deneysel olarak incelenmiştir. Literatürde görülen endüstriyel stoklarda yapılan çalışmalar, ülkemizde son derece azdır. Yurt dışında ise çalışmalar yapılmış olmasına rağmen, yeterli değildir. Bu nedenle yapılan bu çalışma, bu yöndeki eksikleri gidermeyi amaçlamıştır.

Kömürlerin kendiliğinden yanma olayının belirlenmesine yönelik olarak, endüstriyel ölçekli bir kömür stoğunda inceleme yapılmıştır. İncelemeler, Garp Linyitleri İşletmesi, Tunçbilek kömür stok sahasında gerçekleştirilmiştir. Bu kömürler üzerinde doğal şartların etkileri incelenmiştir.

Stok sahasında oluşturulan kömür yığını içerisinde çeşitli noktalarına, sıcaklık farklarını algılayabilecek sıcaklık sensörleri yerleştirilmiştir. Bu sensörlerin yerleştirildiği sondaların 16 adeti 1.5 m, 4 adeti 2.5 m uzunluğundadır. Sensörler, paslanmaz çelikten imal edilen sondaların uç kısmına monte edilerek, yığın içine yerleştirilmiştir. Bu şekilde oluşturulan kömür yığını için, bilgisayarlı ölçüm sistemi gerçekleştirilmiştir. Bu sistem 20 adet sıcaklık, 1 adet havadaki nem, 1 adet hava sıcaklığı, analog - dijital dönüştürücü ve bilgisayardan oluşmaktadır. Bilgisayarlı ölçüm sistemi ile yığın içinden otomatik olarak alınan sıcaklık değerleri, Delphi 3.0 'da yazılan bir programla yapılmıştır. Delphi programlama dilinde yazılan bu program, süresi ayarlanabilen bir zaman aralığında ölçüm yapmak, üç saatte bir tüm ölçüm değerlerinin iki ayrı yedeğini almak ve her kanal için ayrı kalibrasyon özelliklerinden oluşmaktadır. Yapılan bu bilgisayar programı, verilerin alınmasında en önemli katkıyı sağlamaktadır.

Kendiliğinden yanmanın tespitine yönelik olarak hazırlanan iki adet kömür yığını hazırlanmıştır. Bu verileri almak amacıyla, Tunçbilek kömür stok sahasında iki yaz sezonu çalışmalar yapılmıştır. Her bir yığından, 20 farklı noktada ölçüm alınmıştır. Her 5 dakikada bir istasyon noktalarından alınan verilerin toplamı 20.637



adettir. 22 istasyon noktasından toplam 454.014 adet veri bilgisayar yardımıyla alınmıştır. Bu 22 adet veri istasyonu kapsamında; 20 adet yığın içi sıcaklık sensörü, 1 adet hava nem ve 1 adet hava sıcaklık sensörü bulunmaktadır. Aynı zamanda bilgisayar otomatik olarak bu değerleri okurken, manuel olarak her saat başı 3 istasyon noktasından atmosfer basıncı, rüzgar hızı ve rüzgar yönü okumaları alınmıştır. Bunların toplamı ise 5.157 adettir. Genel toplamda ise 459.171 adet veri alınmıştır. Alınan bu veriler üzerinde, istatistiksel modelleme ve sonlu elemanlar metodu çalışmaları yapılmıştır.

İşletmenin kömür stokları uzun süreli bekleme sonucu kendiliğinden yanmaya uğramıştır. Bu stoklar üzerinde 214 saatlik sıcaklık ölçümleri yapılmıştır. Çizelge 4.12'den görüldüğü üzere 5000 kcal/kg seviyelerinden, 2646 kcal/kg seviyesine kadar kalori düşmeleri olmuştur. Bu kalori düşüşü çok fazladır ve işletmeye ciddi ekonomik kayıplar oluşturmaktadır. Ayrıca bu kömür yığını üzerinde 260 ppm gibi yüksek oranda CO ölçümleri alınmıştır. Sahada bekleme sonucu 18-50 kömürde büyük miktarlarda boyut küçülmesi oluşmuştur. Ayrıca ısıl değerde yüksek bir oranda azalma olduğu da açıkça görülmektedir. Isıl değerdeki azalmanın en önemli nedeni, stokların atmosfer şartları etkisinde yanmış olmasıdır.

GLİ Tunçbilek Kömür İşletmesi üretim fazlası kömürleri, açık stoklarda bekletilmekte ve buralarda stok yangınları meydana gelmektedir. Bundan dolayı son 10 yıllık stoklarda yangın sonucu oluşan kömür kayıpları tahminen 500.000 - 1.000.000 ton civarındadır. Bugünkü değerler ile 1 ton kömürün fiyatı 61 USD almak üzere toplam kayıp 30 ile 60 milyon USD arasındadır. Ayrıca bu ekonomik kaybın etkisi çift yönlüdür. Hem yanan kömürün kömür hazırlama tesislerine geri beslenmesi için ek bir maliyet, hem de satılamayıp stoklarda yanmasından dolayı kayıplar söz konusudur. Bu sebepten dolayı stokların kendiliğinden tutuşmasına sebebiyet vermeden, gerekli önlemlerin alınması çok önemlidir.

Yapılan bu çalışma için, farklı boyutlarda bir stok oluşturulmuştur. İşletmede mevcut stok sahasının büyüklüğü, ekipman imkanları ve doğal yığın şev açısına bağlı olarak stoklar, eni 15 - 20 m, yüksekliği 7 - 9 m aralığında



oluşturulmaktadır. Bu çalışma şekli zaman içinde de alışkanlık haline gelmiştir. Ancak, İşletmenin stoklarında sıkça yangınların olduğu gözlenmiştir. Yapılan bu çalışmada, farklı stok boyutları oluşturulmuştur. Stok oluşturulurken, işletmenin yaptığı stoğun yığın şev açısı  $40-42^\circ$  arasında olduğu arazide yapılan ölçümlerle tespit edilmiştir. Bu çalışmada, küçük boyutlu stoğun eni 5 m, yüksekliği 3 m ve uzunluğu ise 10 m olması kararlaştırılmıştır. Bu stoğunda şev açısı, işletmedeki mevcut yığın şev açısı ile aynıdır. Yapılan bu stok üzerinde uzun süreli incelemelerde, ısı birikmesi sonucu kendiliğinden yanma olayı meydana gelmemiştir. Bunun en önemli nedeni, yığında oksidasyon sonucu açığa çıkan ısıнын, yığın içinde birikmemesinden dolayıdır. Bu boyutlarda stok içinde sıcaklık yükselmeleri oluşmamıştır.

Şimdiye kadar Tunçbilek kömürleri üzerinde laboratuvar ölçekli bir çok çalışma yapılmasına rağmen bu stoklardaki kendiliğinden yanma olayları üzerine çok ciddi çalışmalar yapılmamıştır. Yapılan laboratuvar ölçekli çalışmalar da gram mertebelerinde yapılmakta ve sınırlı sayıdaki parametrelerin olay üzerindeki etkisi yalnızca deney şartlarında geçerli olmak üzere incelenebilmektedir. Laboratuvar ölçekli bu çalışmalar ile kendiliğinden yanma olayını bir bütün olarak incelenmesi mümkün görülmediği gibi, elde edilen sonuçlarında pratiğe uyarlanması oldukça zor görülmektedir. Bu nedenle, yapılan bu deneysel çalışmaya ait sonuçların da pratiğe uyarlanabilmesi çok önemlidir.

Arazi ölçümlerinden elde edilen beş dakikalık değerlere, hareketli ortalama filtre yöntemi uygulanmıştır. Bu filtrelemenin yapılmasının nedeni, elektrik şebekesindeki gerilim dalgalanmalarının, kömür yığını yanında çalışan greyder, kamyon, dozer gibi makinelerin sistem üzerindeki etkilerini yok etmektir. Daha sonra bu verilere uygulanan ölçüm aralık sıklığı, beş dakika seviyesinden bir saatlik düzeye çıkarılmıştır. Elde edilen bu değerlere regresyon analizleri uygulanmıştır. Bu amaçla pek çok fonksiyon üzerinde çalışılmıştır. En iyi sonucu veren polinom fonksiyonu olmuştur. Diğer fonksiyon değerlerinde  $R^2$  ler çok düşük çıkmıştır. Bu polinom fonksiyonu üzerinde, arazideki kömür yığımında etkili olan parametrelerin hepsini yansıtacak şekilde bir model geliştirilmeye çalışılmıştır.

Bu verilerin ışığı altında bir istatistiksel model geliştirilmiştir. Geliştirilen istatistiksel model üzerinden yapılan regresyon analizlerinde  $R^2$  değerleri, Tunçbilek kömürleri için  $R^2 = 0.85$  seviyelerindedir ve bu oran arazi ölçüm deneyleri için kabul edilebilir yüksekliktedir.

Kömür stoklarındaki kendiliğinden yanma olayının deneysel olarak incelenmesi arazide yapılmıştır. Deneysel çalışmalardan elde edilen verilerin, teorik analizinin yapılabilmesi için metod araştırması yapılmış ve bu analizler için en uygun yöntemin sonlu elemanlar yöntemi olduğu görülmüştür. Sonlu elemanlar metodu, düzgün olmayan geometrik cisimlere uygulanabilirliği, analizde program içerisinde matematiksel ifadelerin çözümünde en az hata veren güvenilir sonuçların alınabilmesinden dolayı tercih edilmiştir. Deneysel çalışma şartlarının, bilgisayar ortamına tam olarak uyarlanabilmesi için gerçek modelin ölçüleri esas alınarak, iki boyutlu bir model tasarlanmıştır. Bu amaçla oluşturulan iki boyutlu katı model üzerinde gerçek bir kömür yığınının bütün özelliklerini yansıtabilecek şekilde bir model oluşturulmuştur. Modeli oluşturulan kömür yığınının boyutları gerçek yığının boyutları (eni 5 m, yüksekliği 3 m) ve fiziksel yapısı (hava boşlukları ve kömür tanelerinin geometrik yapısı) göz önüne alınarak tasarlanmıştır.

Modelin analizi için gerekli olan fiziksel ve mekanik özellikler literatürden elde edilmiştir. Sonlu elemanlar metodu ile çalışan bir paket program yardımıyla analizlere başlanmıştır. Modeli oluşturulan bileşenlerden, hava ve kömürün her birinin literatürde bulunan fiziksel ve termofiziksel özellikleri ayrı ayrı bilgisayar ortamına aktarılmıştır. Bu verilerin kullanılabilmesi için model sonlu elemanlar ağ yapısına ayrılmıştır. Analizin hassasiyeti için serbest ağ yapısı kullanılmış ve en yüksek eleman sayısı ile çalışılmıştır.

Modelin hava ile temas halinde olan üç yüzeyinin eşit sıcaklığa maruz kaldığı düşünülerek analizler yapılmıştır. Arazi ölçümleri süresince, dış ortam sıcaklıklarının 15°C ile 35°C arasında değiştiği göz önüne alınarak, dış ortam sıcaklığının 15°C'den başlayarak 5°C artışlarla dış ortam sıcaklığı 35°C'ye kadar çözümler yapılmıştır. Bu analiz sonuçlarına göre;

- 1) Dış ortam sıcaklığı 15°C olması halinde en yüksek sıcaklık 13.831°C olarak yığının üst yüzeyine yakın bölgede, en düşük sıcaklık 13.711°C olarak yığının en alt bölgelerinde görülmektedir.
- 2) Dış ortam sıcaklığı 20°C olması halinde en yüksek sıcaklık 17.663°C olarak yığının üst yüzeyine yakın bölgede, en düşük sıcaklık 17.423°C olarak yığının en alt bölgelerinde görülmektedir.
- 3) Dış ortam sıcaklığı 25°C olması halinde en yüksek sıcaklık 21.494°C olarak yığının üst yüzeyine yakın bölgede, en düşük sıcaklık 21.134°C olarak yığının en alt bölgelerinde görülmektedir.
- 4) Dış ortam sıcaklığı 30°C olması halinde en yüksek sıcaklık 25.326°C olarak yığının üst yüzeyine yakın bölgede, en düşük sıcaklık 24.846°C olarak yığının en alt bölgelerinde görülmektedir.
- 5) Dış ortam sıcaklığı 35°C olması halinde en yüksek sıcaklık 29.157°C olarak yığının üst yüzeyine yakın bölgede, en düşük sıcaklık 28.557°C olarak yığının en alt bölgelerinde görülmektedir.

Sonlu elemanlar metodu ile geliştirilen bu model, arazi ölçümü ve istatistik model değerlerine yüksek oranda uygunluk göstermektedir. Geliştirilen modelde kesitler incelendiğinde yığının üst kısımlarında sıcaklıklar daha yüksek, aşağıya doğru inildikçe sıcaklığın düştüğü görülmektedir. Arazi ölçümlerinde de üst yüzeylere yakın noktalardan alınan değerler aynı şekilde yüksek, aşağı bölgelere inildikçe sıcaklıklar düşmektedir. Elde edilen bu iki boyutlu modelin, pratiğe uyarlanması açısından da kullanılabilirliği vardır.

Sonuç olarak, kömürlerin kendiliğinden yanma olayında bir çok faktör etkin rol oynamaktadır. Dolayısı ile kömür yığınlarında oluşan kendiliğinden yanma olayını önlemek veya bu süreyi uzatmak için, gerek yığının oluşturulmasında ve depolama şartlarında, kontrol edilebilen parametrelere ayrıca önem verilmelidir. Bu husustan hareketle yığın yüksekliğinin ve eninin düşük tutulması pratik açıdan büyük önem arz etmektedir. Bu çalışmada yığının eni 5 m, yüksekliği 3 m alınmıştır. Seçilen bu boyutlar yapılan çalışmalar sonucu

kendiliğinden yanma olayı meydana gelmeyerek, stok içinde sıcaklık yükselmeleri oluşmamıştır.

## 6.2. Öneriler

Termik santrale beslenen kömürde de bekleme sonucu yangınlar oluşmaktadır. Bu stoklarda da benzer çalışmanın yapılması faydalı olabilir. Ayrıca Tunçbilek Kömür İşletmesi'nin stok sahalarında değişik stok geometrileri oluşturularak, en optimum ölçüleri bulmaya yönelik çalışmalar yapılabilir.



## 7. KAYNAKLAR DİZİNİ

- Acar, C. ve Divan, Z., 1976, GLİ Tunçbilek Bölgesi Ömerler Köyü Civarı Tektonik Etüdü, TKİ, Ankara.
- Akgün, F., 1994, Kömürlerin kendiliğinden yanmasının teorik ve deneysel incelenmesi, İTÜ, Fen Bilimleri, Doktora Tezi, İstanbul, s 1-142.
- ANSYS 5.5, Ansys, 5.3.1997., Ansys Inc.
- Anaç, S., 2003, Enerji politikalarında Kömürün Yeri, İTÜ Maden Fakültesi, İstanbul.
- Atakuru, T., Atakuru, N. ve Patır, O., 1994, Ara Kesmeli Kalın Kömür Damarlarının Selektif Üretim Yöntemi, Türkiye 9.Kömür kongresi, Zonguldak, s 359-371
- Ateşok G., 1986, Kömür, İstanbul, Kurtiş yayınevi, s 192.
- Ayvazoğlu, E., 1984, Madenlerde Havalandırma ve Emniyet, İTÜ yayınları, No: 3, İstanbul, s 303.
- Banerjee, S.C., 1985, Spontaneous Combustion of Coal and Mine fires, A.A. Balkema Press, Rotterdam, p 165.
- Banerjee, S.C., and Chakravorty, R.N., 1967, Use of DTA in the Study of Spontaneous Combustion of Coal, Journal of Mines Metals and Fuels, January, pp 1-5.
- Banerjee, S.C., Nandy, D.K., and Chakravorty, R.N., 1972, Classification of Coals With Respect to their Susceptibility to Spontaneous Combustion, Trans. Mines Geol., Met. Inst., India, vol. 59, No. 2, July, pp 15-31.
- Baum, M.M., 1981, On Predicting Spontaneous Combustion, Combustion and Flame, Vol 41, pp 187-200
- Baum, M.M., Street, P.J., and Lawn, C.J., 1978, Spontaneous Combustion in Beds of Small Fuel Particles, CEGB, Marchwood Engineering Laboratory Report, R.M.N., 1009, England, pp 251.
- Beier, E., 1973, Einfluss von Fevchtigkeit, Eisensalzen und Mikroorganismen auf die Atmospherische Oxydation von Kohle und Pyrit, Glückauf-Forschungshefte, heft 1. pp 191.
- Berber, A., 2002, İçten Yanmalı Pistonlu Motorlarda Silindirdeki Sıcaklık Dağılımları Ve Isı Akılarının Araştırılması, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Doktora tezi, Konya, s103.

- Berkem, A.R., Boykut, S., ve Berkem, M.L., 1994, Fizikokimya, İstanbul, s 279.
- Brooks, K., and Glasser, D., 1986, A Simplified Model of Spontaneous Combustion in Coal Stockpiles, *Fuel*, vol. 65, pp 1035-1041.
- Brooks, K., Bradshaw, S., and Glasser, D., 1988, Spontaneous Combustion on Coal Stockpiles-An Unusual Chemical Reaction Engineering Problem, *Chem. Eng. Sci.*, Vol. 43, pp 2139-2145.
- Brooks, K., Svanas, N., and Glasser, D., 1988, Evaluating the Risk of Spontaneous Combustion in Coal Stockpiles, *Fuel*, vol. 67, pp 651-656.
- Buzkan, İ., 1990, Zonguldak Karadon Bölgesinde Kozlu Formasyonu Kömürlerinin Petrolojisi ve Değerlendirilmesi, Doktora Tezi, İTÜ Fen Bil.Ens., İstanbul, s 134.
- Bürküt, Y., Suner, F., ve Gültekin, A.Y., 1991, Bazı Anadolu Kömürlerinin Diferansiyel Termik Analizleri, *İTÜ Dergisi*, Cilt 49, Sayı 1, s 44-53.
- Canan, S., Özbay, Y., ve Karlık, B., 1998, A Method For Removing Low Varying Frequency Trend From Ecg Signal, *Proceedings of the 1998 2nd International Conference Biomedical Engineering Days*, p161.
- Carpenter, D.L., and Sergeant, G.D., 1966, The Initial Stages of the Oxidation of Coal With Molecular Oxygen 3. Effect of Particle size on Rate of Oxygen Consumption, *Fuel*, vol. 45, pp 311-327.
- Chamberlain E.A., Barrass, G., and Thirlaway, J.T., 1976, Gases Evolved and Possible Reactions During Low Temperature Oxidation of Coal, *Fuel*, July, pp 217-222.
- Chamberlain, A.C., and Hall, D.A., 1973, The Liability of Coals to Spontaneous Combustion, *Colliery Guardian*, Feb., pp 65-72
- Chamberlain, E.A., Hall, D.A., and Thirlaway, J.T., 1970, The Ambient Temperature Oxidation of Coal in Relation to the Early Detection of Spontaneous Heating, *Mining Engineer*, No. 121, vol 130, October, London, pp 1-16.
- Chauvin, R., Lodel, R., and Philippe, J.L., 1985, Spontaneous Combustion of Coal in *Proceedings of the 21st International Conference of Safety in Mines Research Institutes*, Sydney 21-25 October, (Ed: A.R. Green), A.A. Balkema Press, Rotterdam, pp 465-472.

- Coward, H.F., 1957, Research on Spontaneous Combustion of Coal in Mines A review, NCB res. Report, No. 142.
- Çakır, O., Karakoç, K. ve Kundur, A., 1985, GLİ Tunçbilek Bölgesinde Pilot Mekanize Ayak Uygulaması ve Elde Edilen Sonuçların Değerlendirilmesi, Türkiye Madencilik Bilimsel ve Teknik 9. Kongresi, Ankara, 137-162 s.
- Çınar, İ., 1999, Ermenek Bölgesi Kömürlerinin Kendiliğinden Yanmaya Yatkınlığının Araştırılması, Selçuk Üniversitesi, Yüksek Lisans tezi, Konya.
- Delphi 3.0, 1997, Inc.
- Demirbilek, S., 1986, The Development of a Spontaneous Combustion Risk Classification System for Coal Seams, PhD., University of Nottingham, Department of Mining Engineering, p 263.
- Denby, B., and Ren, T.X., 1992, A knowledge-Based Decision Support System for Spontaneous Combustion Control, Mining Engineer, March, pp 253-258.
- Didari, V., 1986, Yeraltı Ocaklarında Kömürün Kendiliğinden Yanması ve Risk İndeksleri, Madencilik Dergisi, Aralık, Cilt 25, sayı 4.
- Didari, V., Kaymakçı, E., ve Toroğlu, İ., 1993, Kendiliğinden Yanmanın Araştırılmasında Kullanılabilecek bir Laboratuar Deney Düzeneği, Türkiye 13. Madencilik Kongresi, s 69-78.
- Durucan, Ş., Güyagüler, T., 1982, Yeraltı Madenciliğinde Çevre Sorunları ve Kontrol Yöntemleri, Genel Maden İşçileri Sendikası Yayını, Ankara.
- Duzy A.F ve Land G.W., 1985, A Simplified Model of Combustion in Coal Stockpiles, Fuel, vol.65, August, s. 1035-1041
- Edwards, J.C., 1983, Mathematical Modeling of Spontaneous Combustion of Coal, Metal. Soc. AIME, P A83-21.
- Edwards, J.C., 1990, Mathematical Modeling of Spontaneous Heating of a Coalbed, U.S. Bureau of Mines, RI 9296.
- Erkan, H., 1964, Kömürün Depolanması, Madencilik Dergisi, cilt 3, sayı 12, s 13.
- Eroğlu, H.N., 1992, Factors Affecting the Spontaneous Combustion Index, PhD Thesis, University of the Witwaterstrand, Johannesburg, p 263.
- Evseew, V., 1985, New Methods for the Prevention of Spontaneous Fires in Underground Coal Mines, Proceedings of the 21st International Conference



- of Safety in Mines research Institutes (Ed. A.R. Green), A.A.Balkema, Rotterdam, October, pp 481-483.
- Evseev, V.S., and Voroshilov, S.P., 1986, Modeling the Process of Self-Ignition Taking into Account the Influence of Moisture on Oxidative Process in Coal, Soviet Mining Science, vol 22, pp 140-146.
- Feng, K.K., 1985, Spontaneous Combustion of Canadian Coals, CIM Bulletin, vol. 78, no. 877, pp71-75.
- Feng, K.K., Chakravorty, R.N. and Cochrane, T.S., 1973, Spontaneous Combustion- A Coal Mining Hazard, CIM Bulletin, vol 66, no 738, October, pp 75-84.
- Fierro, V., Miranda, J.L., Romero, C., Andres J.M., Arriaga, A., and Schmal, D., 2001, Model Predictions and Experimental Results on Self-Heating Prevention of Stockpiled Coals, Fuel, vol. 80, pp 125-134.
- Fierro, V., Miranda, J.L., Romero, C., Andres J.M., Arriaga, A., Schmal, D., and Visser, G.H., 1999a, Prevention of Spontaneous Combustion in Coal Stockpiles. Experimental Results in Coal Storage Yard, Fuel, vol. 59, pp 23-24.
- Fierro, V., Miranda, J.L., Romero, C., Andres J.M., Pierrot, A., Gomez-Landesa, E., Arriaga, A., and Schmal, D., 1999b, Use of Infrared Thermography for the Evaluation of Heat Losses During Coal Storage, Fuel, Vol. 60, pp 213-229.
- Ghosh, R., 1986, Spontaneous Combustion of Certain Indian Coals - Some Physiochemical Consideration, Fuel, vol. 65, pp 1042-1046.
- Gill, F. and Browning E., 1971, Spontaneous Combustion in Coal Mines, Colliery Guardian, February, pp 79-85
- Glasser D, Bradshaw S., 1990, Advances in Reactor Design and Combustion Science. In: Handbook of Heat and Mass Transfer, vol. 4., p 107.
- GLİ Bölge Müdürlüğü faaliyet raporu, 2003, Tavşanlı
- Gouws, M.J., 1987, Crossing-Point Characteristics and Differential Thermal Analysis of South African Coals, Msc Dissertation, Department of Mining Engineering, University of Witwaterstrand, Johannesburg, p 279.
- Gouws, M.J., Gibbon, G.J., Wade, L., and Phillips, H.R., 1991, An Adiabatic Apparatus to Establish the Spontaneous Combustion Propensity of Coal, Mining Science and Technology, vol 13, pp 417-422.

- Guin, J.A., Curtis, C.W., and Sahawneh, B.M., 1986, Laboratory Study of the Selfheating Tendency of Coals and the Pyrolysis Chars, Inian Eng. Chemical, Process Des. Dev., vol 25, pp 543-546.
- Güney, M., 1968, Certain Factors Affecting the Oxidation and the Spontaneous Combustion of Coal, University of Nottingham, Mining Department Magazine, vol 20, pp 71-80
- Güney, M., 1971, Oxydation und selbsterhitzung uon Steinkohle, Glückauf-forschungshefte, Nr. 32, H.6.
- Güney, M., and Hodges, D.J., 1969, Adiabatic Studies of the Spontaneous Heating of Coal, Part I, Colliery Guardian, February, pp 105-108.
- Hodges, D.J. and Hinsley, F.D., 1964, The Influence of Moisture on the Spontaneous Heating of Coal, Mining Engineer, pp211-221.
- Humpreys, D., and Richmand, A., 1983, Ventilation Practice of Extraction Panels in Seams Liable to Spontaneous Combustion, Aust., IMM Illawarra Branch Symposium on Ventilation in Coal Mines, May.
- Ismail, I.M.K., and Walker, P. L. Jr, 1989, DSC and TG Measurements of O<sub>2</sub> Interaction with Coal Chars, Fuel, vol 68, pp 1456-1460
- Jones, R.E., and Townend, D.T.A., 1949, Oxidation of Coal, Journal Society of Chemical Industry, vol. 68.
- Kaji, R., Hishinuma, Y., and Nakamura, Y., 1985, Low Temperature Oxidation of Coals Effects of Pore Structure and Composition, Fuel, vol. 64, pp 297-302.
- Kaji, R., Hishinuma, Y., and Nakamura, Y., 1987, Low Temperature Oxidation of Coals-A Calorimetric Study, Fuel, Vol. 66, pp 154-157.
- Kakaç, S., 1998, Örneklerle Isı Transferi, Tıp Teknik Yayıncılık, 12. Baskı, 621.4022.Karsner, G.G., and Pelmutter, D.D., 1981, Reaction Regimed in Coal Oxidation AICHE Journal, vol. 27, pp 920-927.
- Karsner, G., and Perlmutter, D.D., 1982, Model for Coal Oxidation Kinetics-1 Reaction Under Chemical Control, Fuel, vol 61, pp 29-34
- Kaymakçı, E., 1998, Zonguldak Havzası Kömür Damarlarına Uygulanabilecek Bir Kendiliğinden Yanmaya Doğal Yatkinlığı Değerlendirme Tekniğinin Geliştirilmesi, Doktora tezi, Zonguldak Karaelmas Üniversitesi, Zonguldaks 148.

- Kaymakçı, K., and Didari, V., 2000, Relations Between Coal Properties and Spontaneous Combustion Parameters, Turkish Journal Eng. Environmental Sci., 26, 2000.
- Kim, A.G., 1977, Laboratory Studies on the Spontaneous Heating of Coal, U.S. B.M., IC, 8756.
- Kok, A., Bolt, N., and Jelgersma, J.H.N., 1989, Spontaneous Heating and Stockpiling Losses of Coal, Kema. Sci. Tech., Rep. Vol 7, no 2, pp 63-89.
- Kröger, C., Beier, E., 1962, Die Verwitterung von Steinkohlen, Brennstoff-Chemie, No.11, Band 43.
- Kural, O., 1991, Kömür, İstanbul, s 658
- Lord S.B., 1986, Some Aspects of Spontaneous Combustion Control, The Mining Engineer, May 1986, pp 479-487
- Lauredeau, N.M., 1978, Heterogeneous Kinetics of Coal Char Gasification and Combustion, Prog. Energy Combust. Sci, vol. 4, p 221-270.
- Mahadevan, V., and Ramlu, M., 1985, Fire Risk Rating of Coal Mines due to Spontaneous Heating, Journal of Mines, Fuels, August, pp 357-362.
- Morita, M., Nishimoto, T., Kodama, J., Ohsawa, T., and Hayashi, K., 1986, Spontaneous Combustion of Coal, IV. Fire Science and Tech., vol. 6, No. 1-2, pp 7-20.
- Morris, R., and Atkinson, T., 1988, Seam Factor and The Spontaneous Heating of Coal Mining Science and Technology. Vol.7, Amsterdam, pp149-159.
- Nakoman, E., 1971, Kömür, MTA Ens. Yayını , No 8, Ankara, s 348.
- Nandy, D.K., Banerjee, D.D., and Chakravorty, R.N., 1972, Applivation of Crossing Point Temperature for Determining the Spontaneous Heating Characteristics of Coal, J. Mimens, Metal and Fuels, vol 20, February, pp 41-48.
- Ninteman D.J., 1986, Spontaneous Oxidation and Combustion of Sulfide Ores in Underground Mines, U.S. Bureu of Mines, 1C, 8775.
- Nishimoto, T., Morita, M., and Yajima, H., 1986, Spontaneous Combustion of Coal III. Fire Science and Technology, vol. 6, No:1-2, pp 1-6.
- Nordon, P., 1979, A Model for the Self-Heating Reaction of Coal and Char, Fuel, vol. 58, pp 456-464.

- Nordon, P., and Bainbridge, N.W., 1983, Heat of Wetting of a Bituminous Coal, Fuel, vol. 62, pp 619-621.
- Nordon, P., Young, B.C., and Bainbridge, N.W., 1979, The Rate of Oxidation of Char and coal in Relation to Their Tendency to Self-Heat, Fuel, vol.58, pp 443-449.
- Ökten, G; Didari V., Şensöğüt, C., 1998, Kömürün Kendiliğinden Yanması ve Yanmanın Önlenmesi İçin Alınacak Tedbirler, Bölüm 15, Kömür Özellikleri, Teknolojisi ve Çevre İlişkileri, s 243-256
- Özpeker, I., 1991, Kömür oluşumu, Petrografisi ve Sınıflandırılması, Kömür, Ed. Kural, O., s 658
- Özşen, H., 2003, Bazı Türk Kömürlerinin Termogravimetrik Özelliklerinin Belirlenmesi, Yüksek Klisans Tezi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya, s 269
- Palmer, A.D., Cheng, M., Goulet, J.C., and Furimsky, E., 1990, Relation Between Particle Size and Properties of Some Bituminous Coals, Fuel, vol. 69, pp 183-188.
- Panaseiko, N.P., 1974, Influence of Moisture on the Low-Temperature Oxidation of Coals, Solid Fuel Chemical, vol. 8, pp 21-24.
- Patır, O., Atakuru, T. ve Çoğuplugil, N., 1989, GLİ Tunçbilek Bölgesi Açıkocaklarında Patlatma Çalışmalarının Değerlendirilmesi, Türkiye Madencilik Bilimsel ve Teknik 11. Kongresi, Ankara, 137-160 s.
- Porter H. C., Ralsten O. C., 1914, A Study of the Oxidation of Coal, US Bureau of Mines, vol 65, pp 1-30.
- Ramlu, A.R., 1991, Mine Disasters and Mine Rescue, A.A., Balkema, Rotterdam, p 396.
- Ren, T.X., and Edwards, J.S., and Clarke, D., 1999, Adiabatic Oxidation Study on the Propensity of Pulverized Coals to Spontaneous Combustion, Fuel, Vol. 78, pp 1611-1620.
- Ren, T.X., and Richards , M.J., 1994, A Computerised System for the Study of the Spontanepos Combustion of Coal, The Mining Engineer, 154(398).

- Ren, T.X., and Richards, M.J., 1993, The Study of the Liability of Coals to Spontaneous Combustion, Türkiye 9. Kömür Kongresi Bildiriler Kitabı, s 71-86.
- Saraç, S., 1992, Yeraltı Kömür Ocaklarında Kendiliğinden Yanma, Anadolu Üniversitesi Mühendislik- Mimarlık Fakültesi Yayını, no: 16, s 118
- Schmal, D., 1989, Spontaneous Heating of Stored Coal in Chemistry of Coal Weathering, Ed. C.R. Nelson, Ch. 6, Elsevier, Amsterdam, pp 133-215.
- Sevenster P.G., 1961, Studies on the Interaction of Oxygen with Coal in the Temperature 0-90 C, Part I, Fuel, vol. 40, pp7-17
- Shartley and Williams, 1965, Elements of Physics, Fourth Ed. Prentices, USDA, Agric. Hand book, No:42, Madison, WI, p 42.
- Singh, R.N., Demirbilek, S., and Turney, M., 1984, Application of Spontaneous Combustion Risk Index to Mine Planning, Safe Storage and Shipment of Coal, Journal of Mines Metal and Fuels, July, pp 347-355.
- Smith, A.C., and Lazzara, C.P., 1987, Spontaneous Combustion Studies of U.S. Coals, Bureau of Mines Report of Investigation, RI 9079.
- Sondreal, E.A., and Ellman, R.C., 1974, Laboratory Determination of Factors Affecting Storage of North Dakota Lignite, U.S. Bureau of Mines, RI 7887, P 83.
- SPSS 9.0, Inc. 1998.
- Stott, J.B., 1980, The Spontaneous Heating of Coal and the Role of Moisture Transfer, Report to the U.S. Bureau of Mines, Contract 395-146.
- Stott, J.B., and Chen, X.D., 1992, Measuring the Tendencies of Coal to Fire Spontaneously, Colliery Guardian, pp 9-16.
- Stott, J.B., Harris, B.J., and Hansen P.J., 1987, A Full-Scale Laboratory Test for the Spontaneous Heating of Coal, Fuel, vol. 66, pp 1012-1013.
- Surfer Demo Version 8.00, Surface Mapping System, Golden Software Inc.
- Şensöğüt, C., 1997, A General Outlook on Spontaneous Combustion İn Underground Coal Mines, German Academic Exchange Servise, Aachen, Germany, September, p 81.
- Şensöğüt, C., and Çınar, İ., 1999, Spontaneous Combustion Liability of Turkish Coals – A Case Study, International Symposium on Mine Planning and

- Equipment Selection (MPES-1999) and on Mine Environmental and Economical Issues (MEEI-1999), National Mining University of Ukraine, Ukraine, s.421-425.
- Şensöğüt, C., ve Çınar, İ., 1998, Ermenek Bölgesi Kömürlerinin Kendiliğinden Yanmaya Yatkinlıklarının Araştırılması, Türkiye 8. Kömür Kongresi, Bartın, s 1-8.
- Tarafdar, M.N., and Guha, D., 1989, Application of Wet Oxidation Processes for the Assessment of the Spontaneous Heating of Coal, Fuel, vol. 68, pp 315-317.
- Tsai, S.C., 1982, Fundamentals of Coal Benefication and Utilization, Elsevier, NY.
- Ünver B., ve Özözen, A., 1998; Kömür Stoklarında Meydana Gelen Kendiliğinden Yanma Süreci ile İlgili Modeller ve Alınması Gereken Tedbirler, Madencilik Dergisi, vol. 37 no. 3, Eylül, s 29-40.
- Ünver, B., 1997, Determination of Spontaneous Combustion Risk Potential of Colliery Wastes for the Environmental Impact Assessment, Mineral Resources Engineering, vol 5, Nr. 3.
- Van Doornum, G.A.W., 1954, The Spontaneous Heating of Coal, Fuel, vol. 27, pp 482-495.
- Van Doornum, G.A.W., 1970, Assessing a Coal's Liability Towards Spontaneous Combustion, Fuel Research Inst., South Africa, IC No:14.
- Veselovsky, V.S., 1957, Surface Oxidation of Coals, Chemical Abstracts, Col, 18547, November.
- Wade, L., 1988, The Propensity of South African Coals to Spontaneously Combust, PhD. Thesis, University of the Witwaterstrand, Johannesburg, p 281.
- Wade, L., and Gouws, M.J., 1990, Coals Liable to Self-Heating, Colliery Guardian, March, pp 83-84.
- Yörükoğulları, E., 1997, Doğal Zeolitlerde Fiziksel Adsorpsiyon Uygulamaları, Anadolu Üniversitesi Yayını, No. 988, Eskişehir.
- TMMOB-MMO, 2002, <http://www.mining-eng.org.tr>
- EN-BAK., 2003, <http://www.enerji.gov.tr>

**EKLER****EK-A1 DELPHI 3.0 DILINDE YAZILAN “Doktora Projesi-1” ADLI PROGRAM**

```

PROCEDURE FindPCSpeed;
var
  iStart,iEnd:LONGINT;
  Hrs,Mins,Secs,HSecs:WORD;
  rdiff,timedelay: REAL;
  i,j,k:LONGINT;
  Present: TDateTime;
BEGIN
  j:=100000;
  rdiff:=0;
  while (rdiff<0.2) do
    BEGIN
      present:=now;
      DecodeTime(Present, Hrs, Mins, Secs, HSecs);
      iStart:=Secs*100+HSecs;
      for i:=0 to j do k:=k+1;
      present:=now;
      DecodeTime(Present, Hrs, Mins, Secs, HSecs);
      iEnd:=Secs*100+HSecs;
      rdiff:=iEnd-iStart+1;
      rdiff:=rdiff/100;
      if (rdiff<0.2) then j:=j*10;
    END; {end while}
  k:=Round(2.0/rdiff); { Determine the number of counts to do in 2 seconds }
  j:=j*k;
  k:=0;

```



```
present:=now;
DecodeTime(Present, Hrs, Mins, Secs, HSecs);
iStart:=Secs*100+HSecs;
for i:=0 to j do k:=k+1; { Do the counting }
present:=now;
DecodeTime(Present, Hrs, Mins, Secs, HSecs);
iEnd:=Secs*100+HSecs;
rdiff:=iEnd-iStart+1;
rdiff:=rdiff/100; { Get the time elapsed in secs }
timedelay:=rdiff/(i+1);
if (timedelay<0.000002) then
{ if the timedelay is under 2uSecs get a value for gSpeed }
BEGIN
gSpeed:=Round(0.000002/(timedelay));
END
else gSpeed:=1; { otherwise let gSpeed = 1 }
mSecDelay(2000);
END;
```

**EK-A2 DELPHI 3.0 DILINDE YAZILAN “Doktora Projesi-2” PROGRAM**

The ReadADC function reads the MAX186 ADC

If ChanMode=0 then it is a differential reading and

Channel can be 1 to 4.

Channel 1=ADC inputs 1 & 2

Channel 2=ADC inputs 3 & 4

Channel 3=ADC inputs 5 & 6

Channel 4=ADC inputs 7 & 8

If ChanMode=1 then it is a single ended reading and

Channel can be 1 to 8 where the ADC input is the same as the Channel number.

If ChanMode or Channel is outside the range function returns a -1

}

FUNCTION ReadADC(ChanMode,Channel : INTEGER) :INTEGER;

var

i,Word,Mask,err :INTEGER;

Bit :BYTE;

BEGIN

err:=0;

ControlReg:=ControlReg and 253; { Hex fd }

yaz(LPTControl,ControlReg); { CS High }

yaz(LPTData,0); { SCLK Low, DIN Low }

case ChanMode of

1 : if (( Channel<0) OR (Channel>8)) then err:=-1;

0 : if((Channel<0) OR (Channel>4)) then err:=-1;

else

err:=-1;

end;

if err=0 then

BEGIN

```

Channel:=Channel-1;
Word:=0;
if (ChanMode=1) then { Single Ended }
  BEGIN
    if (Channel AND 1) <> 0 then Word:=Word OR 4;
    if (Channel AND 2) <> 0 then Word:=Word OR 1;
    if (Channel AND 4) <> 0 then Word:=Word OR 2;
  END
else Word:=Channel;
Word:=Word SHL 4;
ChanMode:=ChanMode SHL 2;
Word:=Word OR ChanMode;
Word:=Word OR 138;

ControlReg:=ControlReg or 2;
yaz(LPTData,0); { SCLK Low, DIN Low }
yaz(LPTControl,ControlReg); { Bring CS Low }
Mask:=128;
for i:=1 to 8 do { send the control word }
  BEGIN
    Bit:=Word and Mask;
    if(Bit<>0) then
      BEGIN
        yaz(LPTData,2); { CS Low SCLK Low, DIN High }
        Wait(gSpeed);
        yaz(LPTData,3); { CS Low SCLK High, DIN High }
        Wait(gSpeed);
      END
    else
      BEGIN
        yaz(LPTData,0); { CS Low SCLK Low, DIN Low }
        Wait(gSpeed); { CS Low SCLK High, DIN Low }
      END
    end if;
  END
end for;

```

```

        yaz(LPTData,1); { CS Low SCLK High, DIN High }
        Wait(gSpeed);
        END;
    Mask:=Mask SHR 1;
    END;
yaz(LPTData,0); { CS Low SCLK Low, DIN Low }
Wait(20*gSpeed); { The ADC does its conversion here }
Word:=0;        { Now get the reading }
for i:=1 to 12 do
    BEGIN
        Word:=Word SHL 1;
        yaz(LPTData,1); { Bring Clk High }
        Wait(gSpeed);
        yaz(LPTData,0); { Bring Clk Low }
        Wait(gSpeed);
        Bit:=oku(LPTStatus); { read ADC's Data Out }
        Bit := Bit and 8;
        if(Bit<>0) then Word:=Word or 1;
        END;
    ControlReg:=ControlReg and 253; { Hex fd }
    yaz(LPTControl,ControlReg);    { Bring CS High }
    END;
if err=0 then ReadADC:=Word;
if err=-1 then ReadADC:=-1;
END;

```

**EK-A3 TİMER 1 PROSEDÜRÜ**


```

procedure TForm1.Timer1Timer(Sender: TObject);
var deger:double;
Present: TDateTime;
degler: array[1..10] of integer;
i,j,kz:integer;
Hrs,Mins,Secs,HSecs,y,m,d:WORD;
begin
for i:=1 to 10 do begin
degler[i]:=readadc(1,2);
wait(100)
end;
for i:=1 to 9 do
for j:=i+1 to 10 do
if degler[i]>degler[j] then begin kz:=degler[i];degler[i]:=degler[j];degler[j]:=kz; end;
kz:=degler[5]+degler[6]+degler[7];
deger:=kz/3;
//deger:=readadc(1,2);
stringgrid1.Cells[0,kanal]:=floattostr(round((deger-
strtofloat(o.lines.strings[kanal]))*strtofloat(k.lines.strings[kanal])*10)/10);
trackbar1.Position:=kanal;
kanal:=kanal+1;
if kanal>20 then kanal:=0;
writealldop(kanal);
writealldop(kanal);
present:=now;
DecodeTime(Present, Hrs, Mins, Secs, HSecs);
decodedate(present,y,m,d);
edit1.Text:=inttostr(hrs)+':'+inttostr(mins)+':'+inttostr(sec);
edit2.Text:=inttostr(d)+'/'+inttostr(m)+'/'+inttostr(y);
end;

```

**EK-A4. EKSTREMUMLARDAN ARINDIRAN ORTALAMA FİLTRE  
PROĞRAMI**

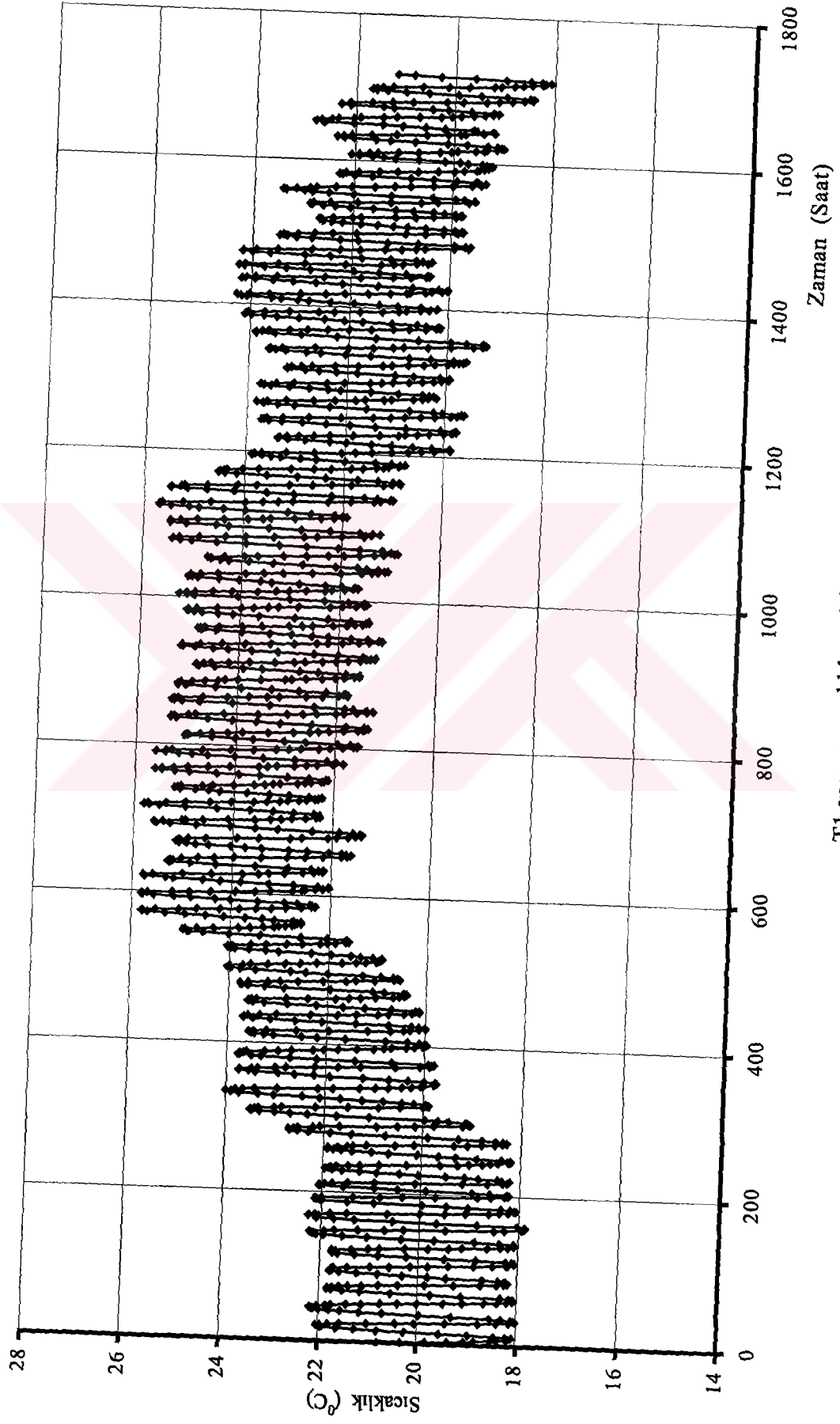
```
for i:=1 to 10 do begin
degler[i]:=readadc(1,2);
wait(100)
end;
for i:=1 to 9 do
for j:=i+1 to 10 do
if degler[i]>degler[j] then begin kz:=degler[i];degler[i]:=degler[j];degler[j]:=kz; end;
kz:=degler[5]+degler[6]+degler[7];
deger:=kz/3;
```



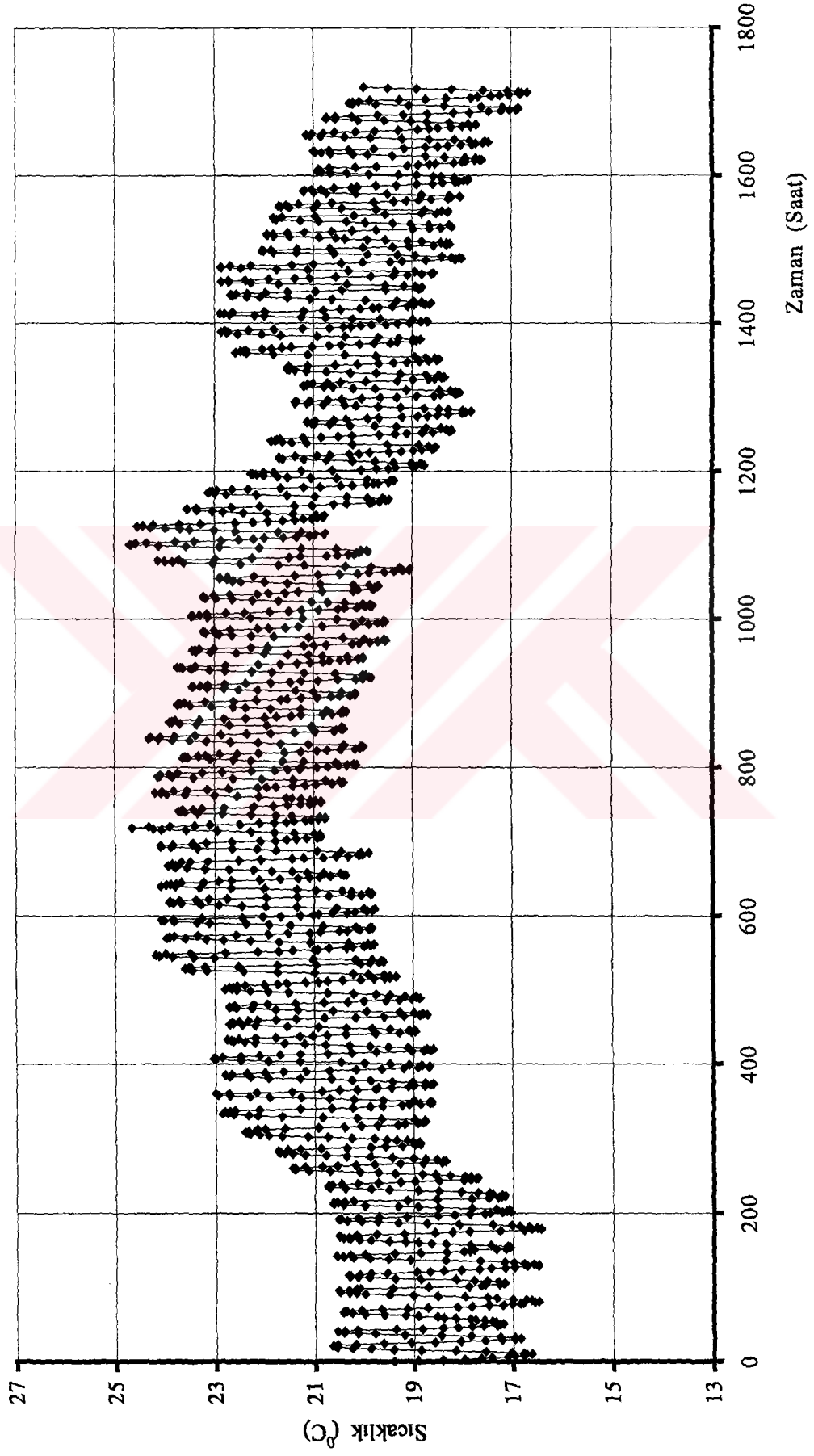
EK-B. FİLTRELENMİŞ 1 SAATLİK ARALIKLARLA ALINMIŞ DEĞERLERLE  
ÇİZİLEN ZAMAN-SICAKLIK EĞRİLERİ



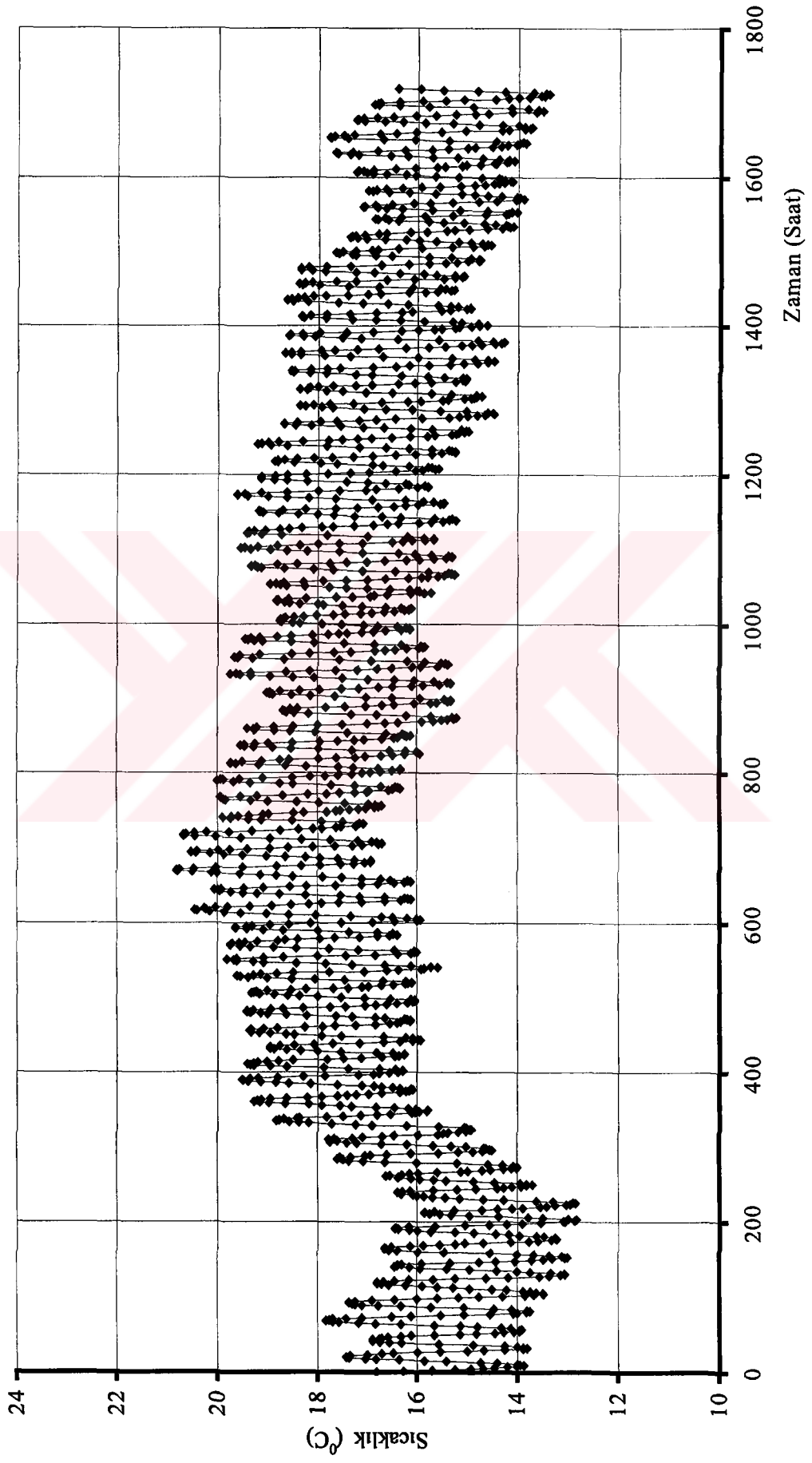




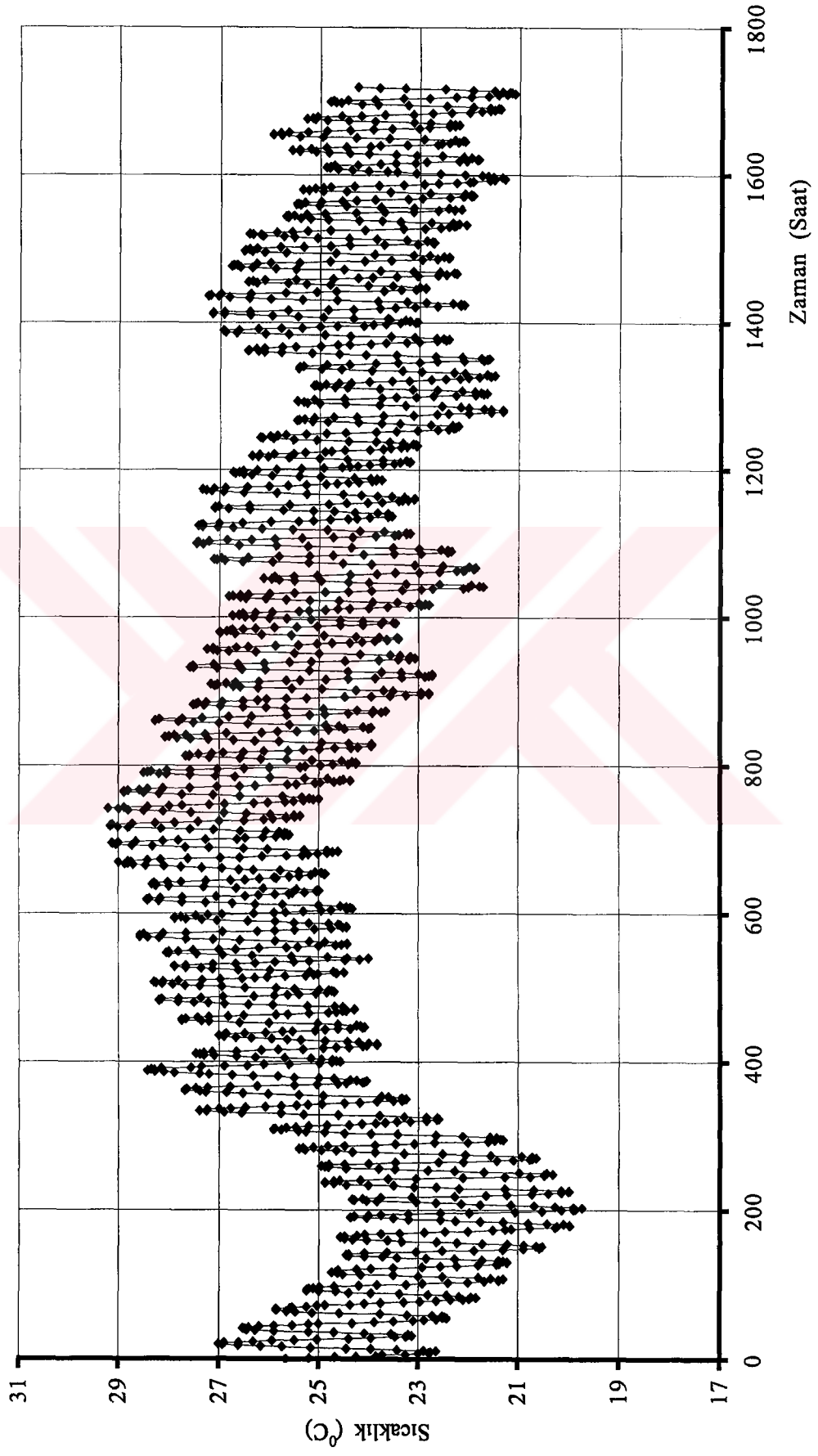
T1 zaman-sıcaklık eğrisi



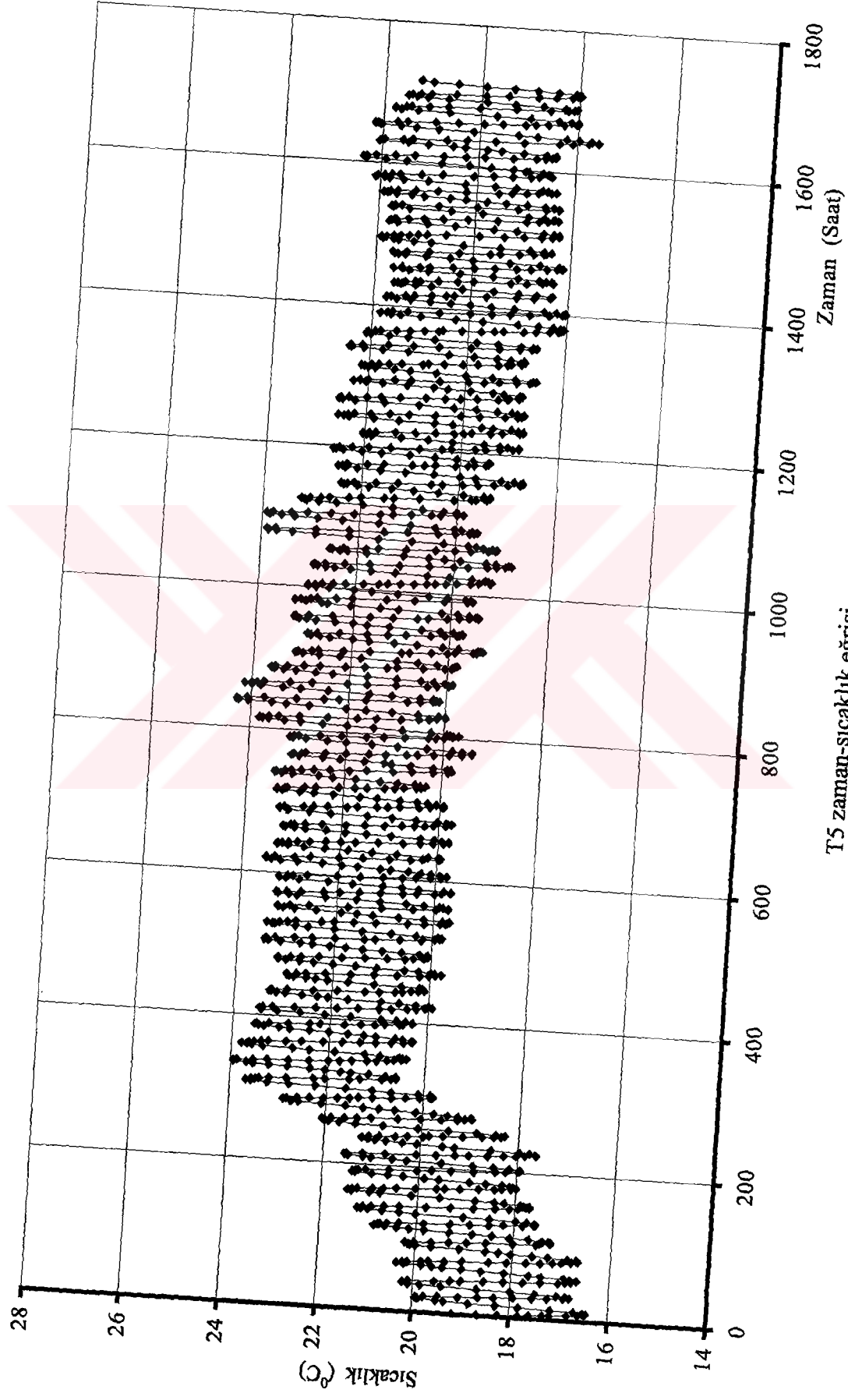
T2 zaman-sıcaklık eğrisi



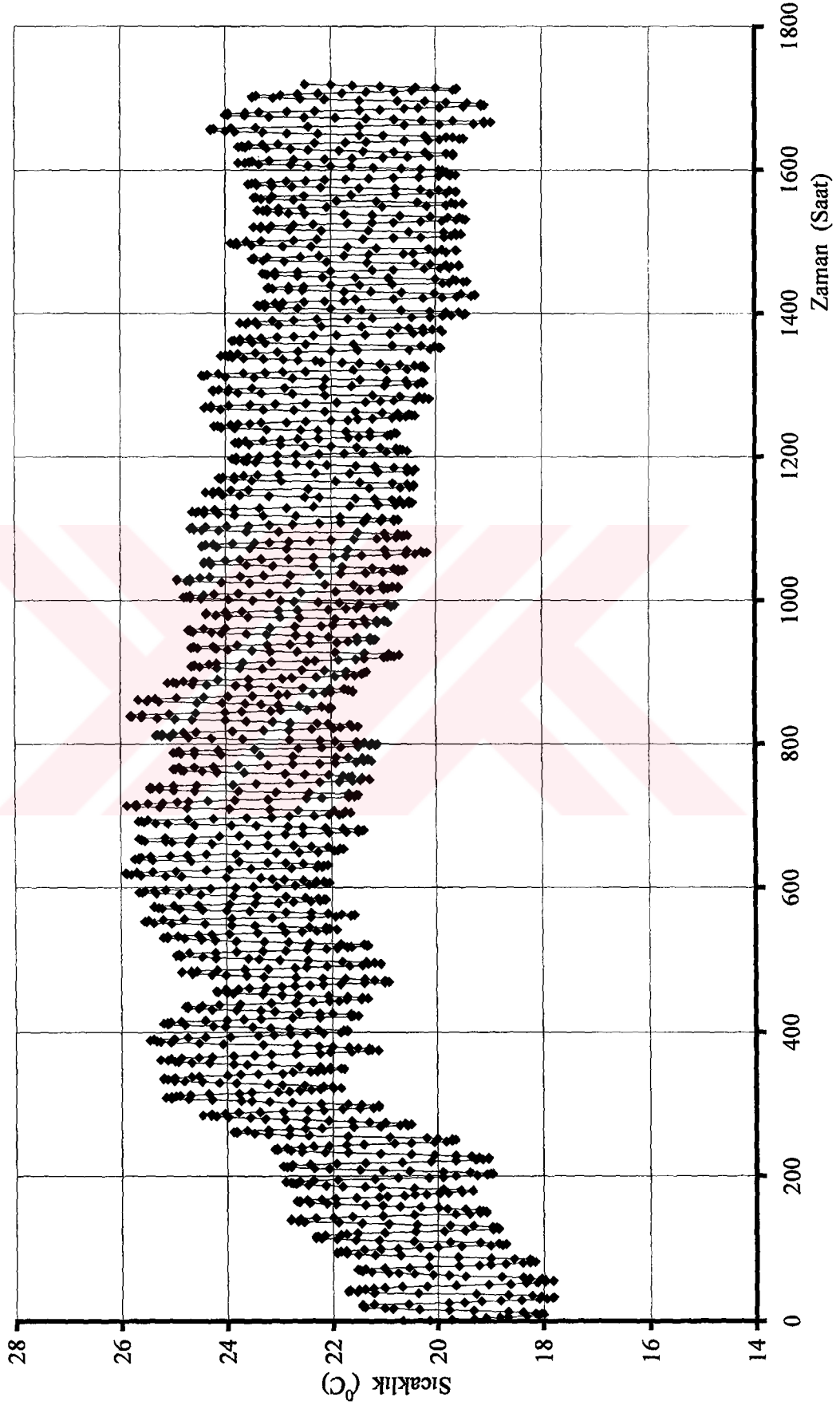
T3 zaman-sıcaklık eğrisi



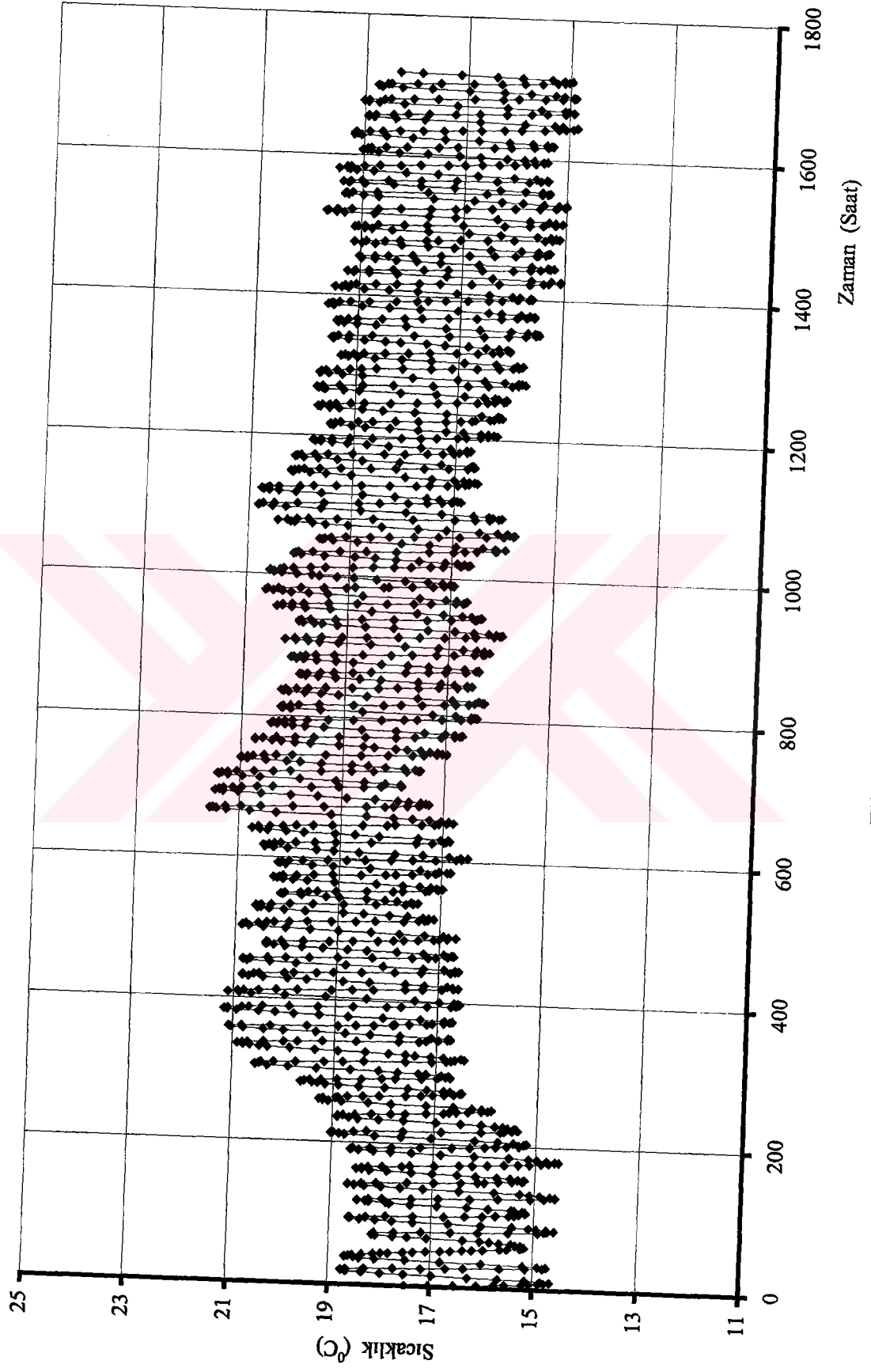
T4 zaman-sıcaklık eğrisi



T5 zaman-sıcaklık eğrisi

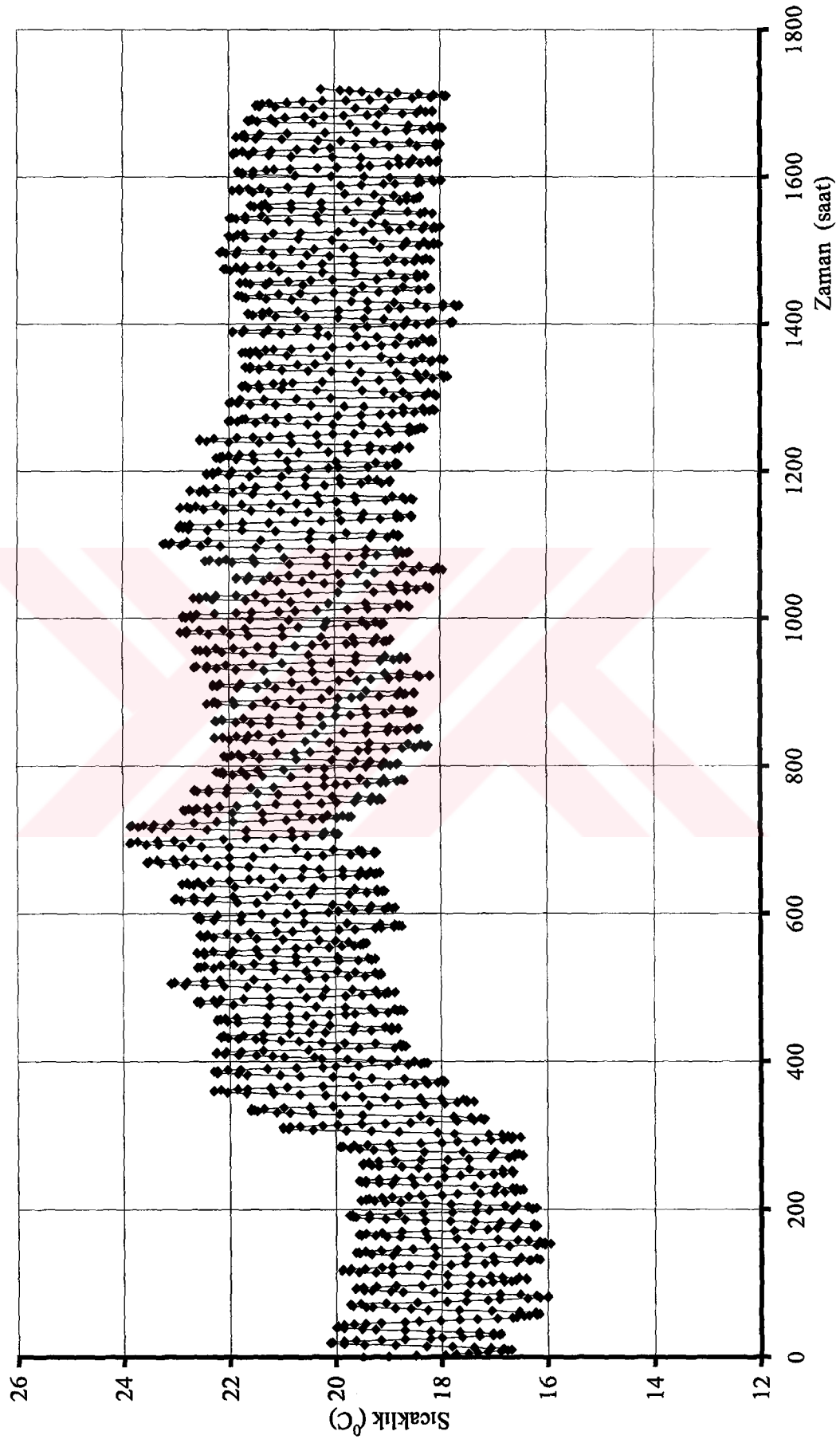


T6 zaman-sıcaklık eğrisi

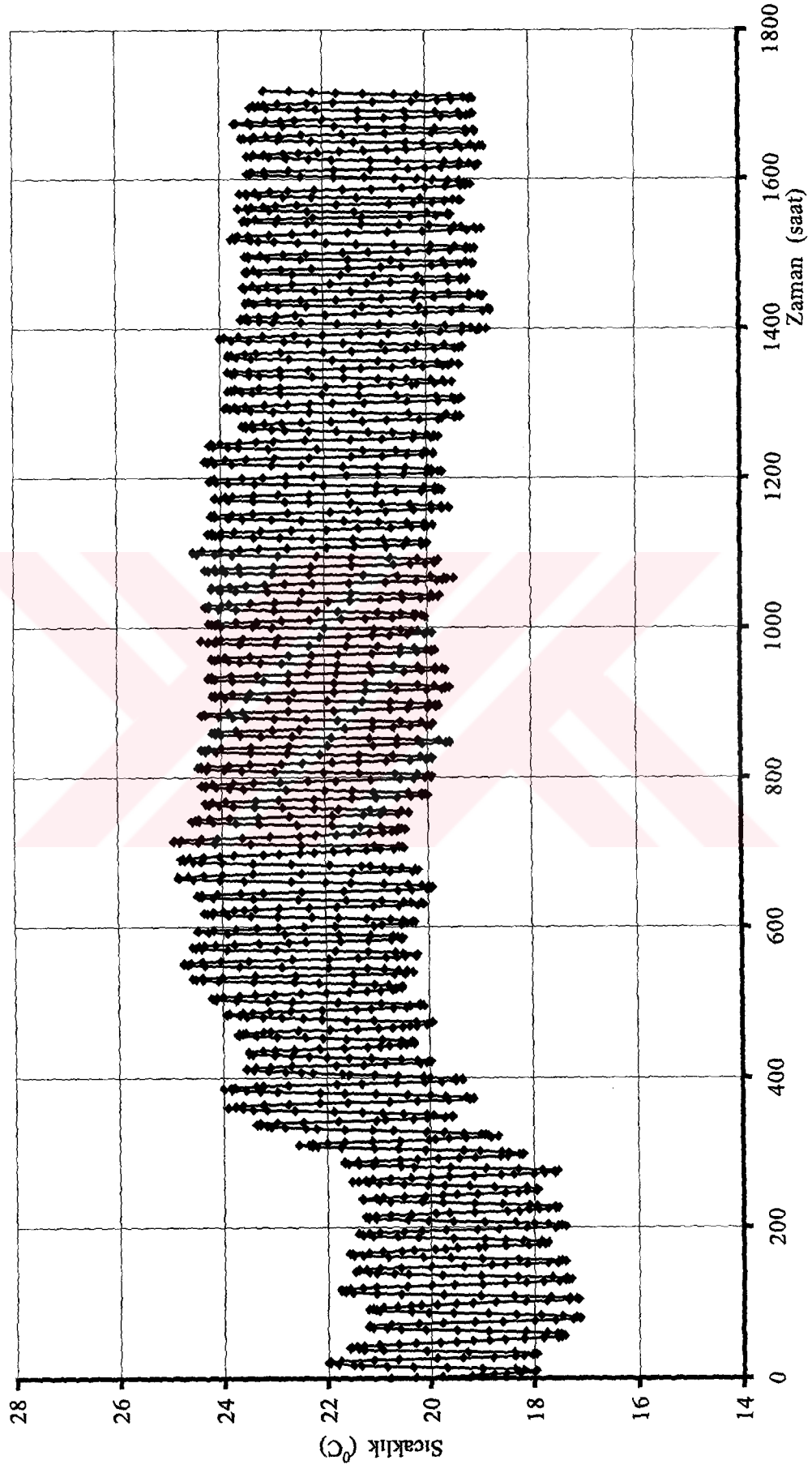


T7 zaman-sıcaklık eğrisi

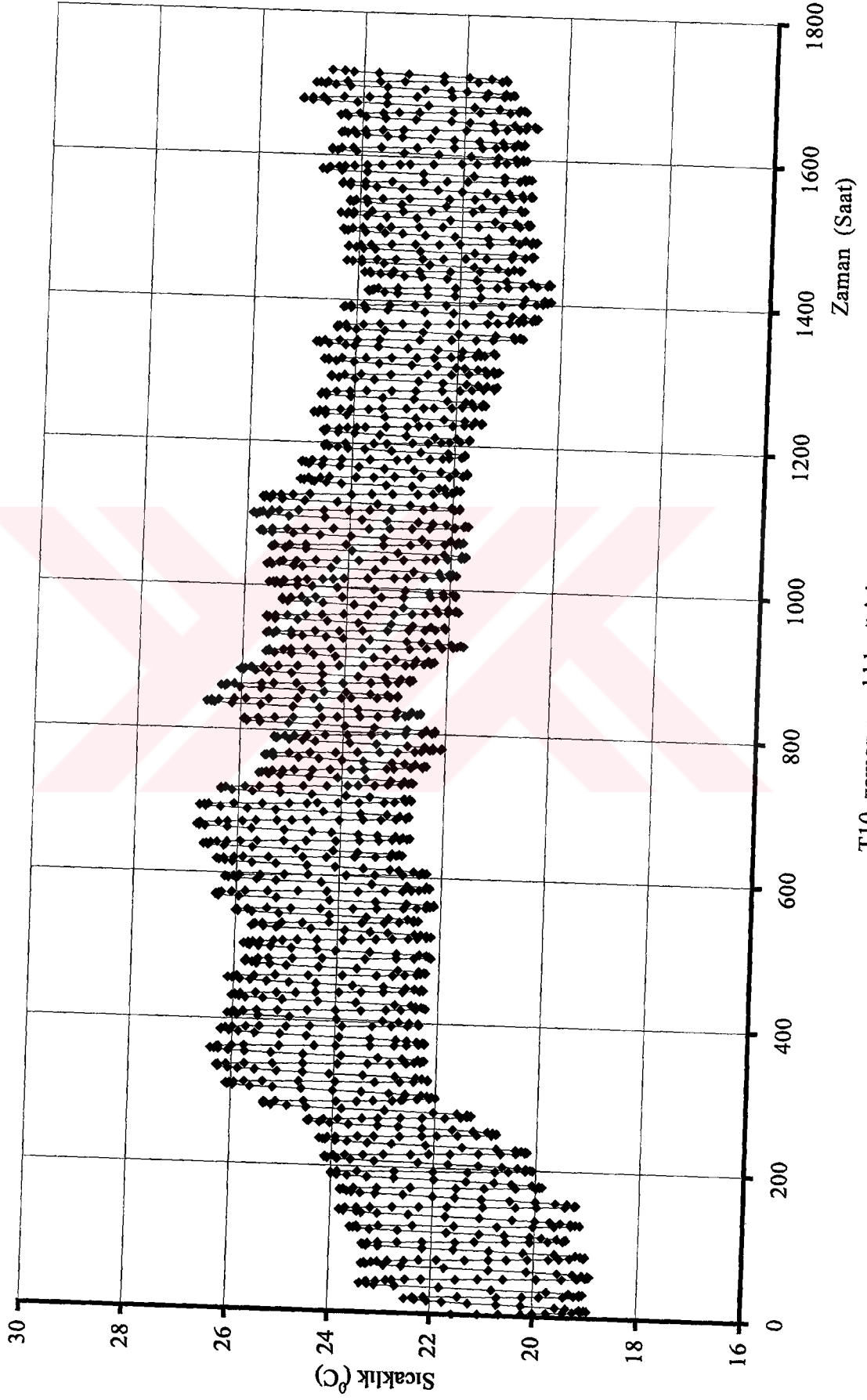




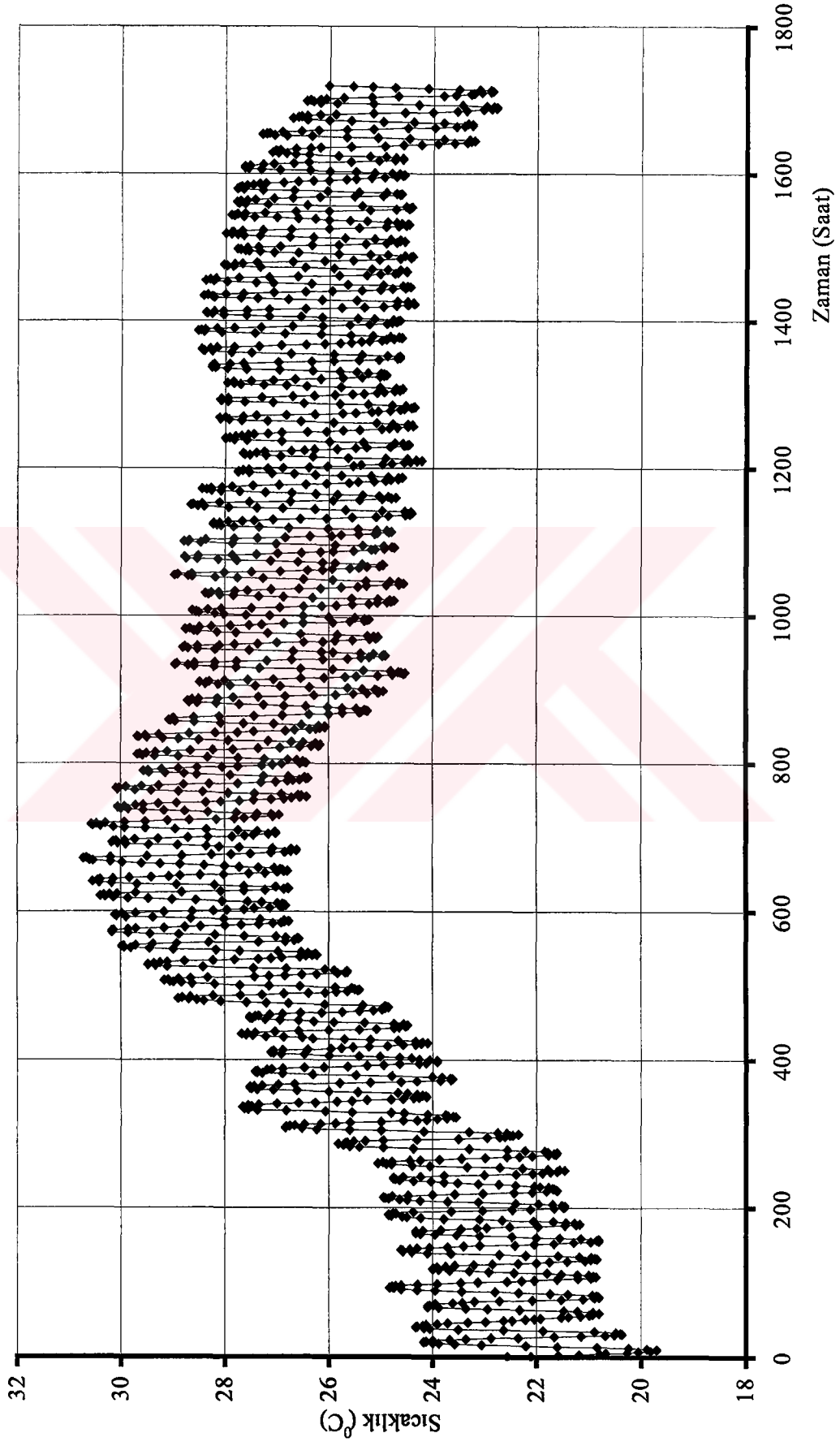
T8 zaman-sıcaklık eğrisi



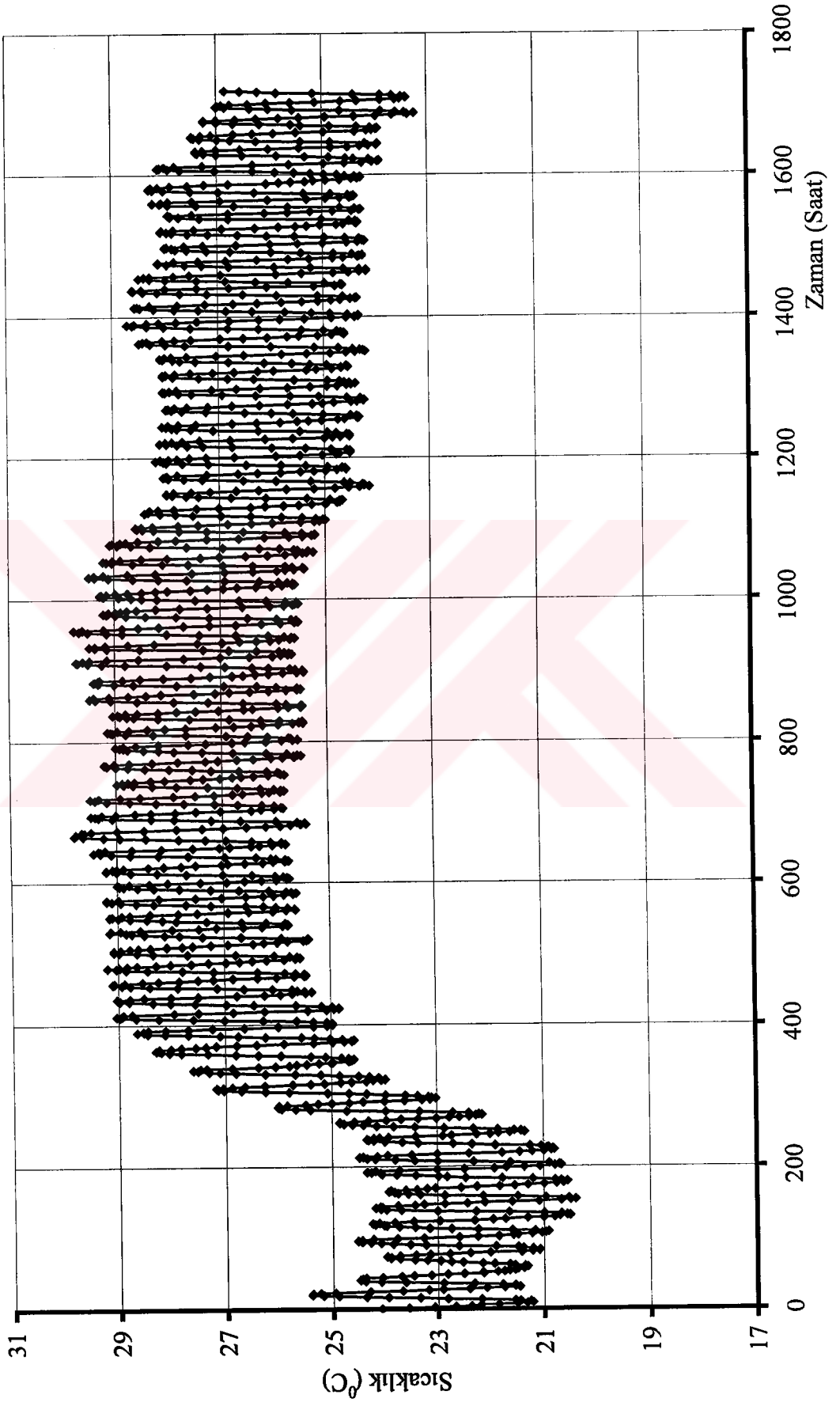
T9 zaman-sıcaklık eğrisi



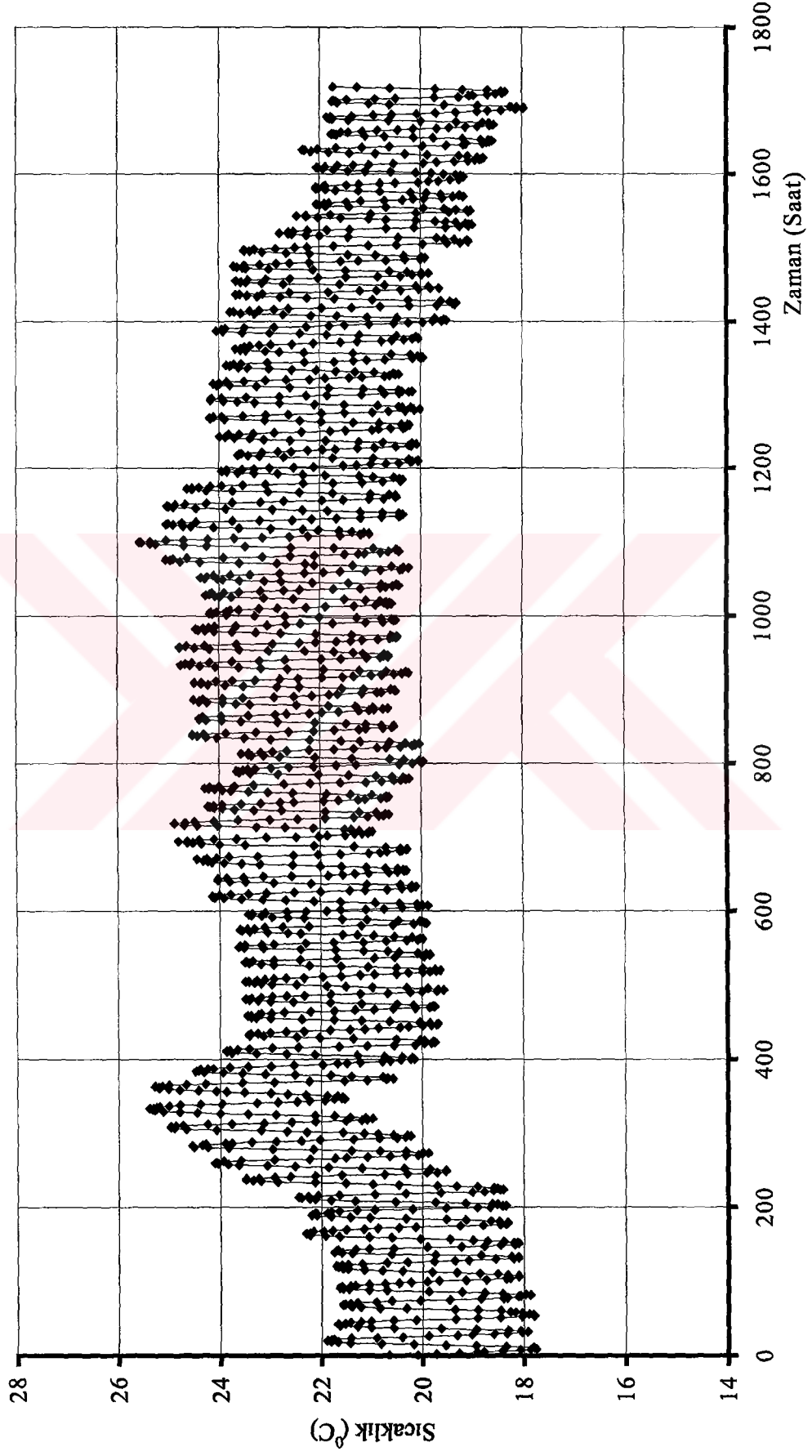
T10 zaman-sıcaklık eğrisi



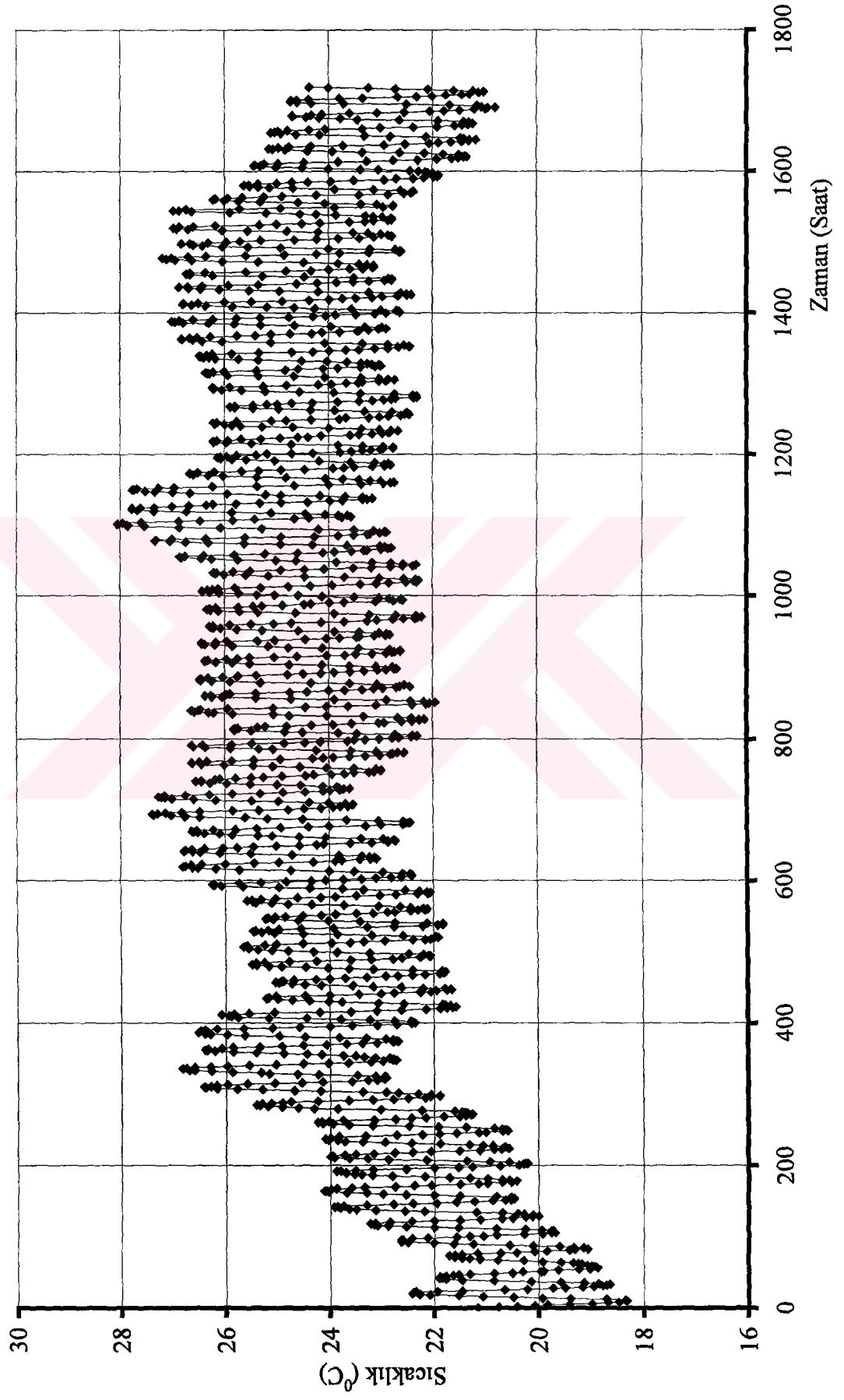
T11 zaman-sıcaklık eğrisi



T12 zaman-sıcaklık eğrisi

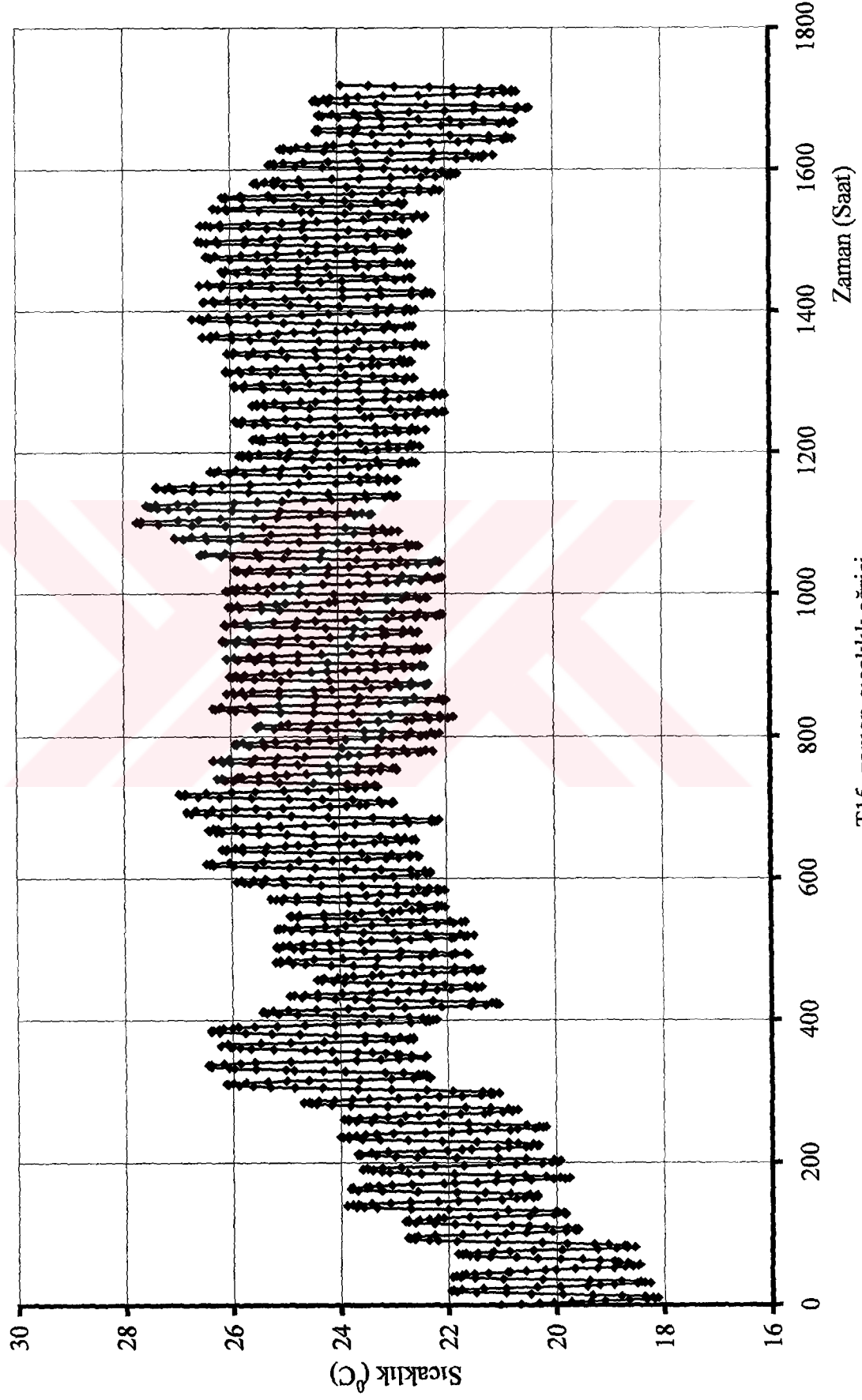


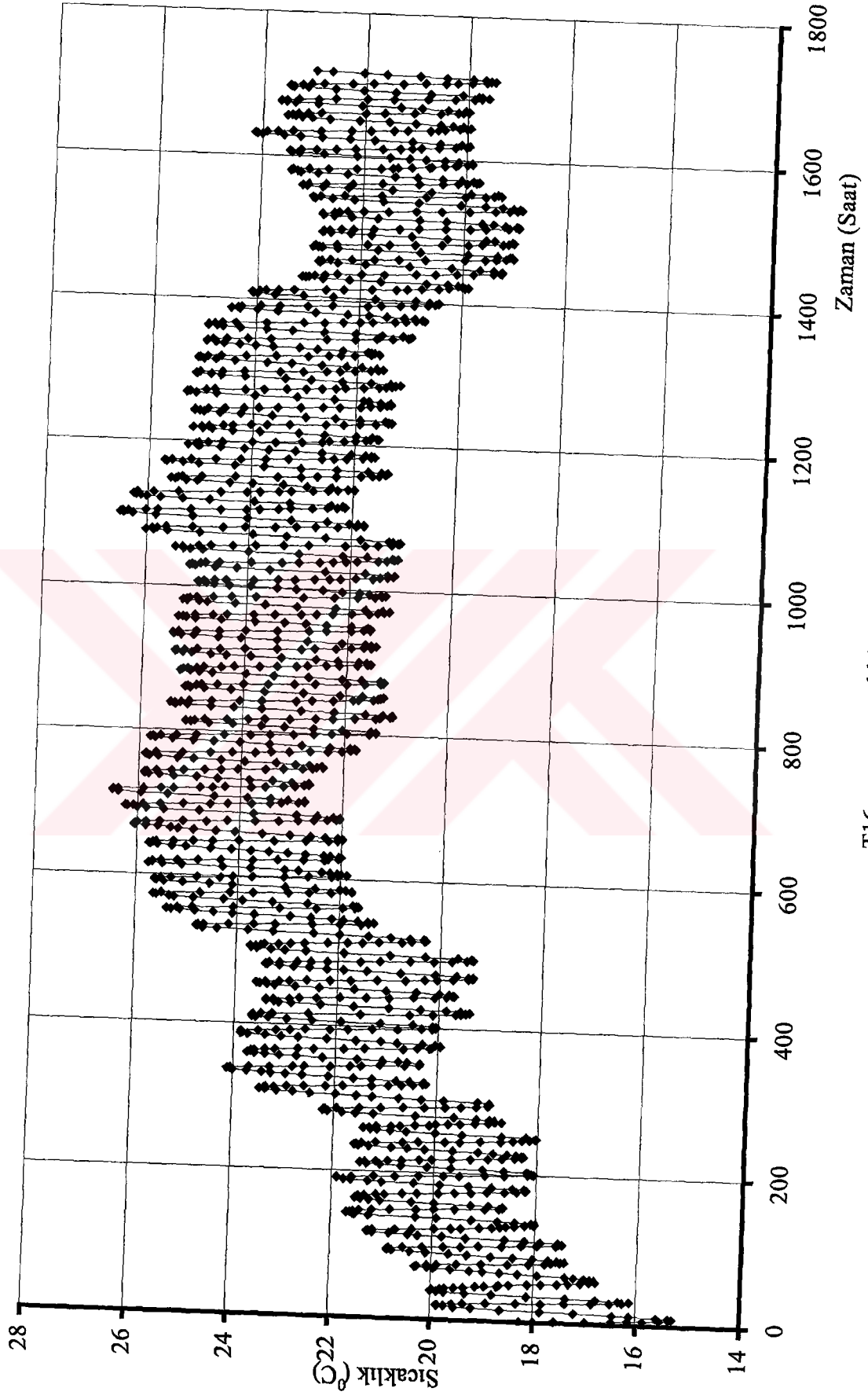
T13 zaman-sıcaklık eğrisi



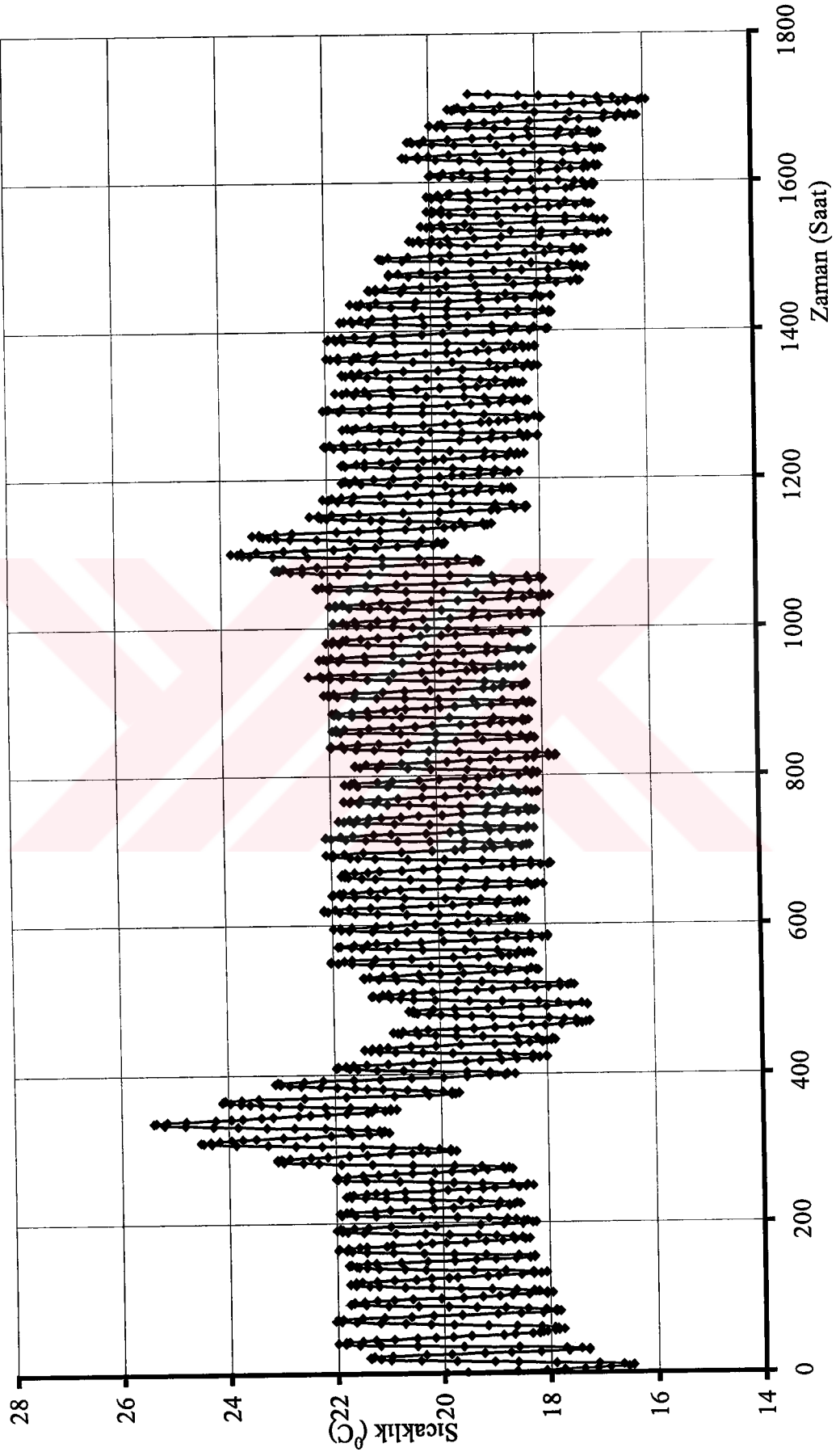
T14 zaman-sıcaklık eğrisi



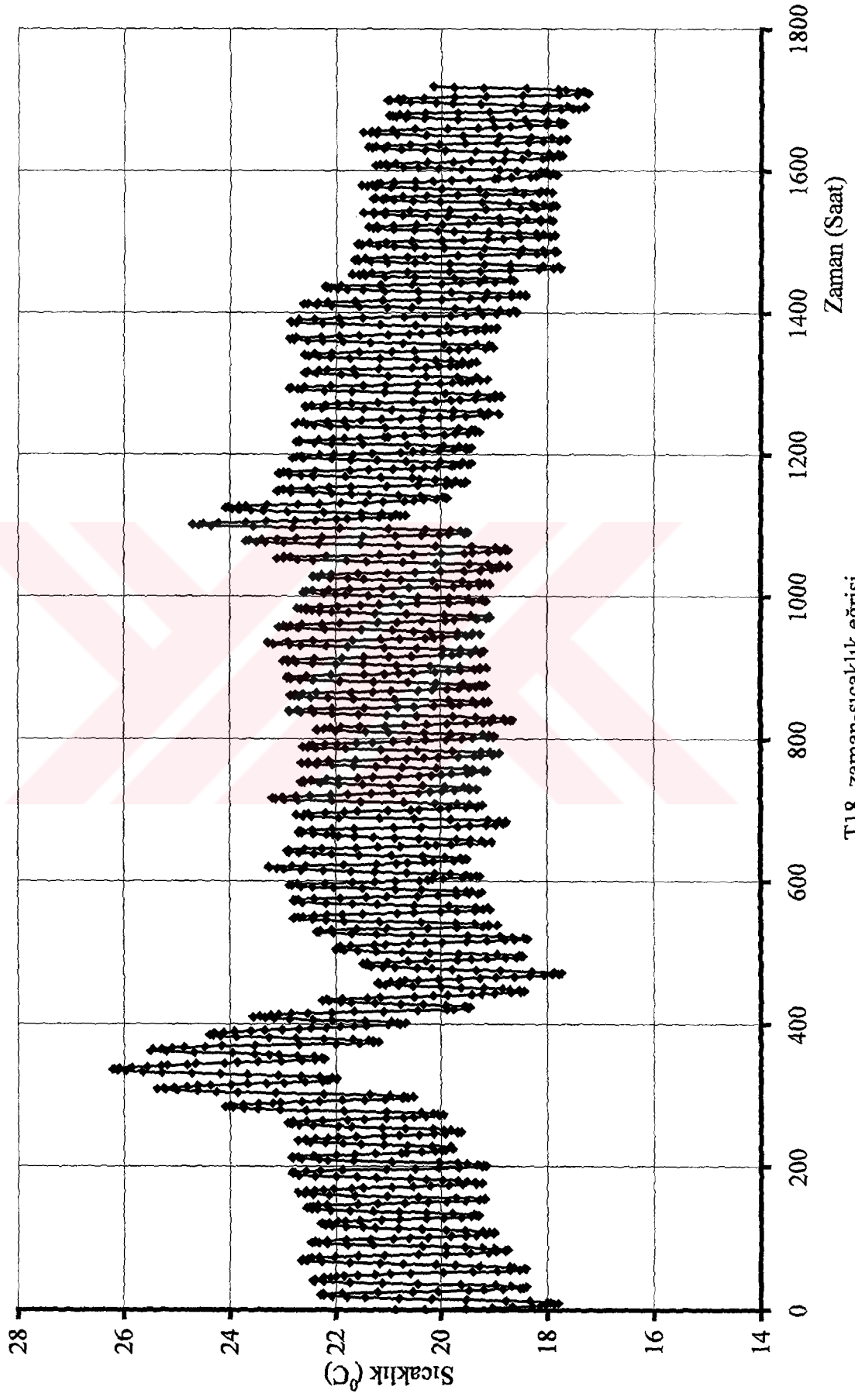




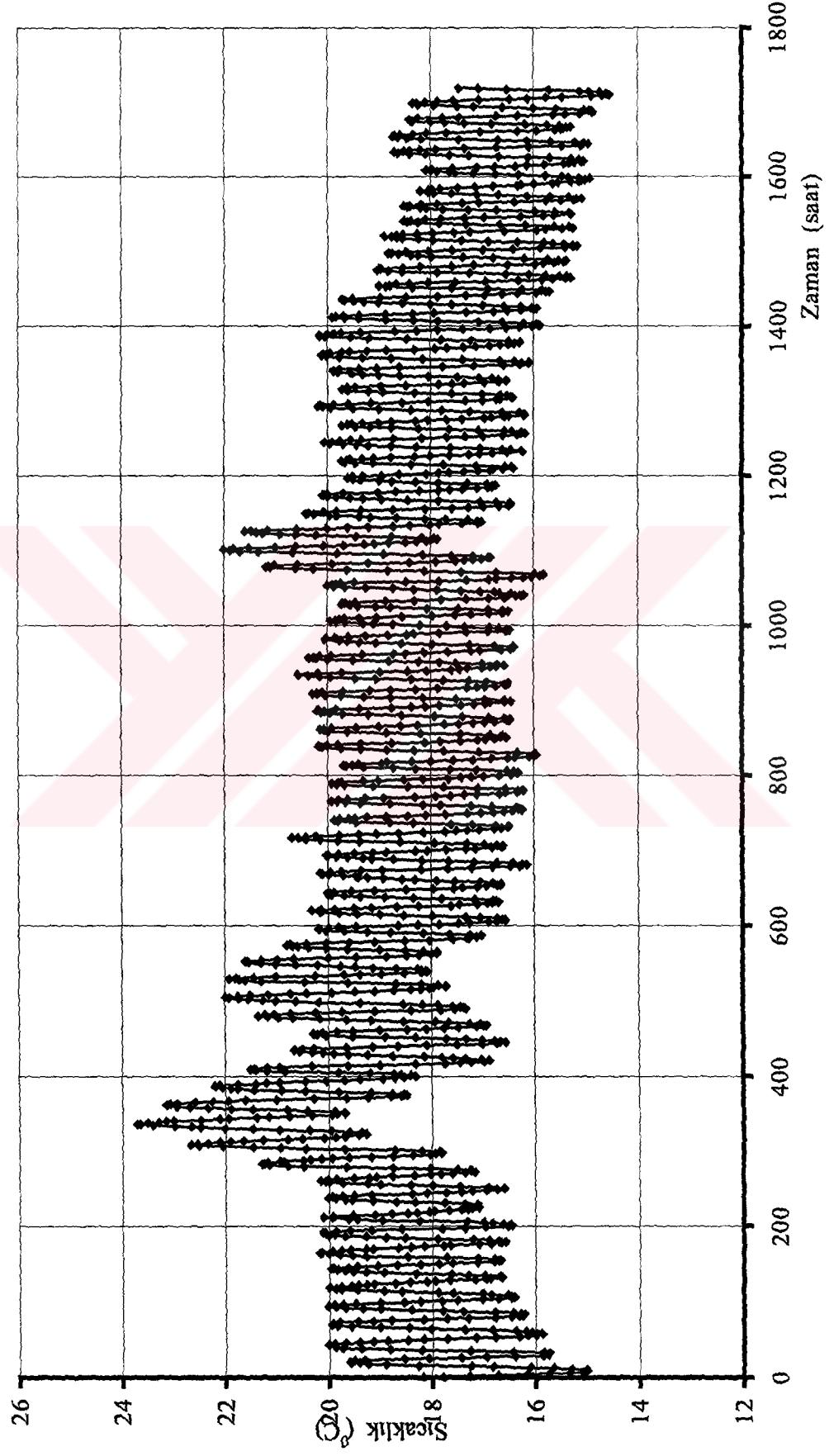
T16 zaman-sıcaklık eğrisi



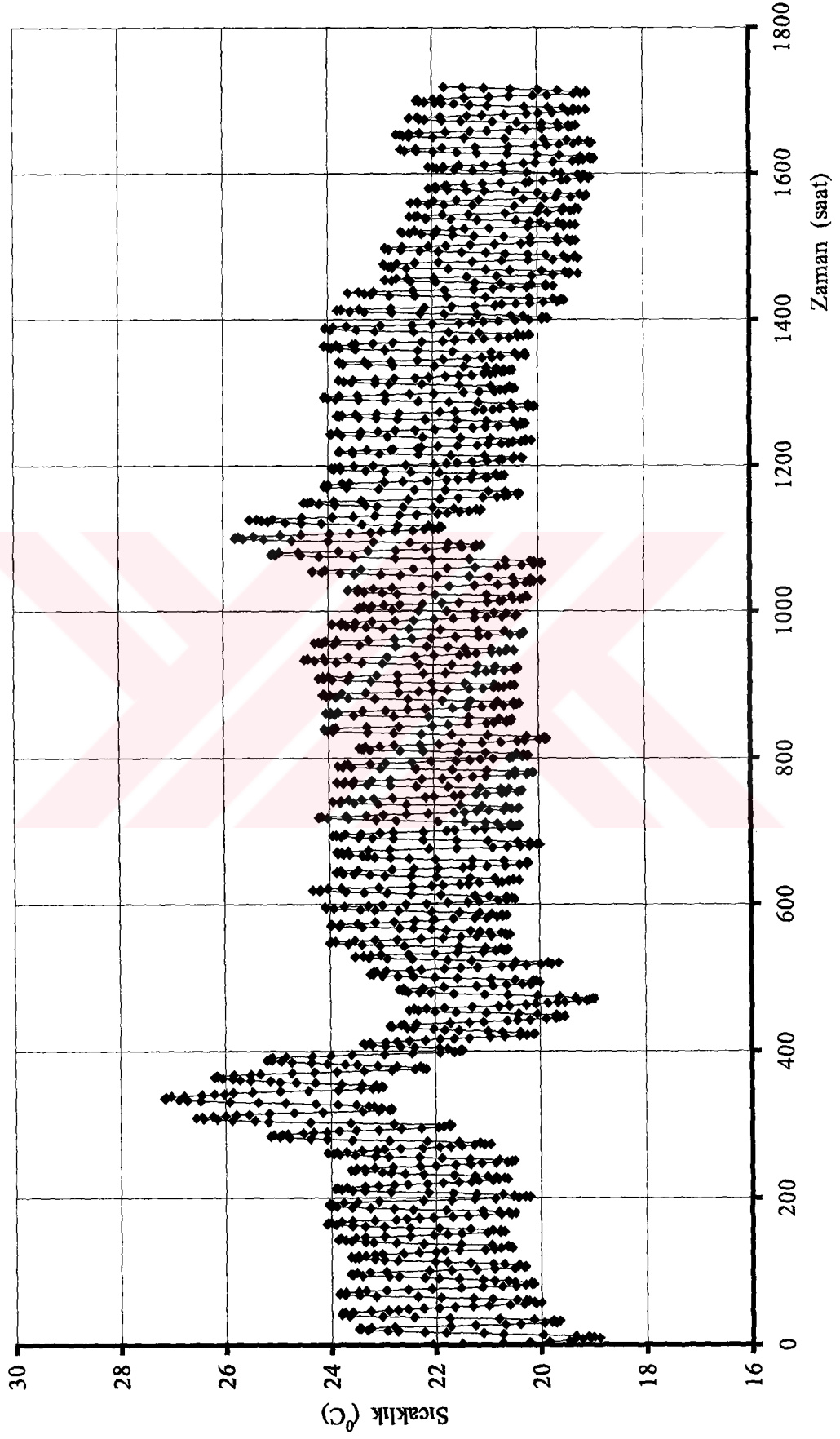
T17 zaman-sıcaklık eğrisi



T18 zaman-sıcaklık eğrisi



T19 zaman-sıcaklık eğrisi

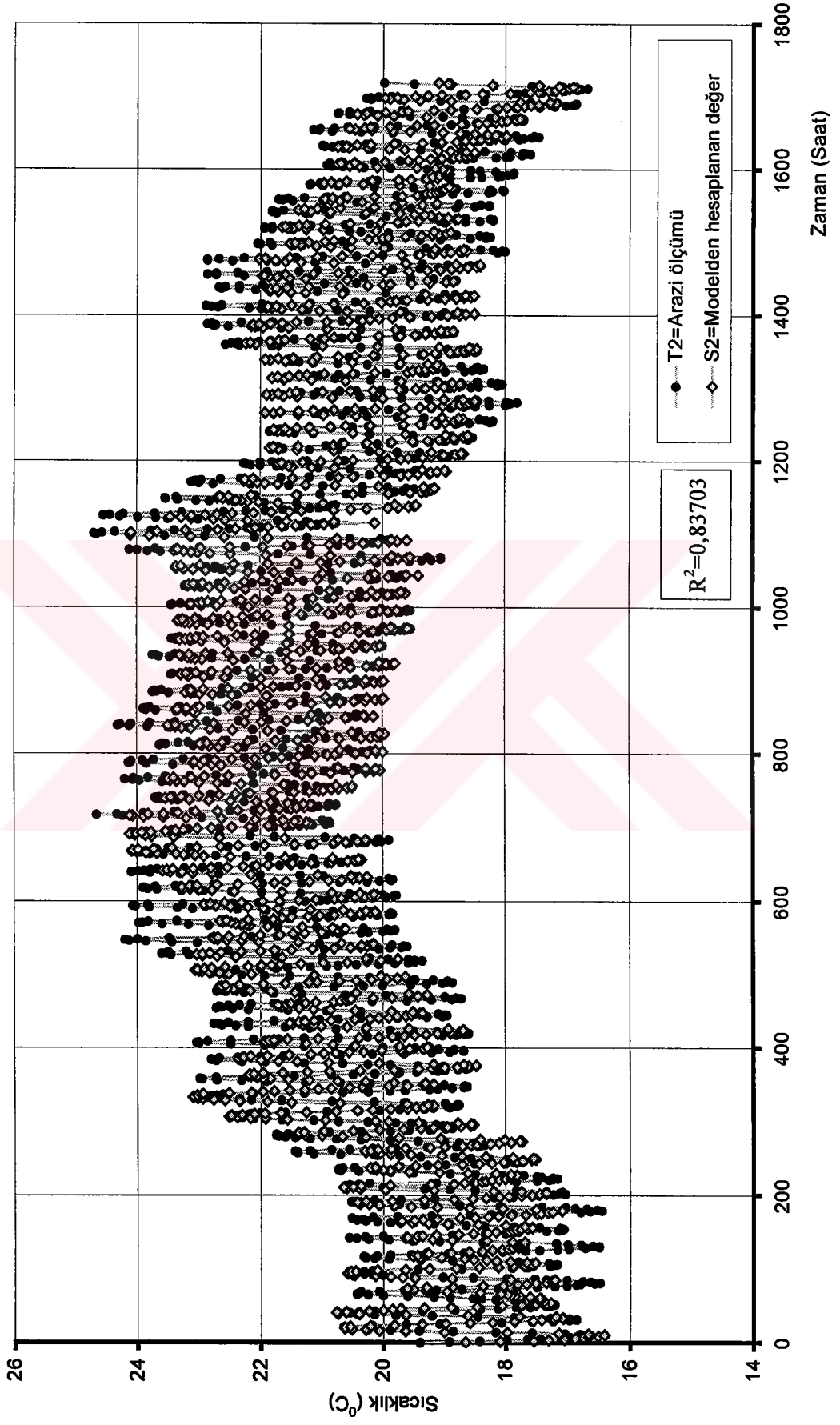


T20 zaman-sıcaklık eğrisi

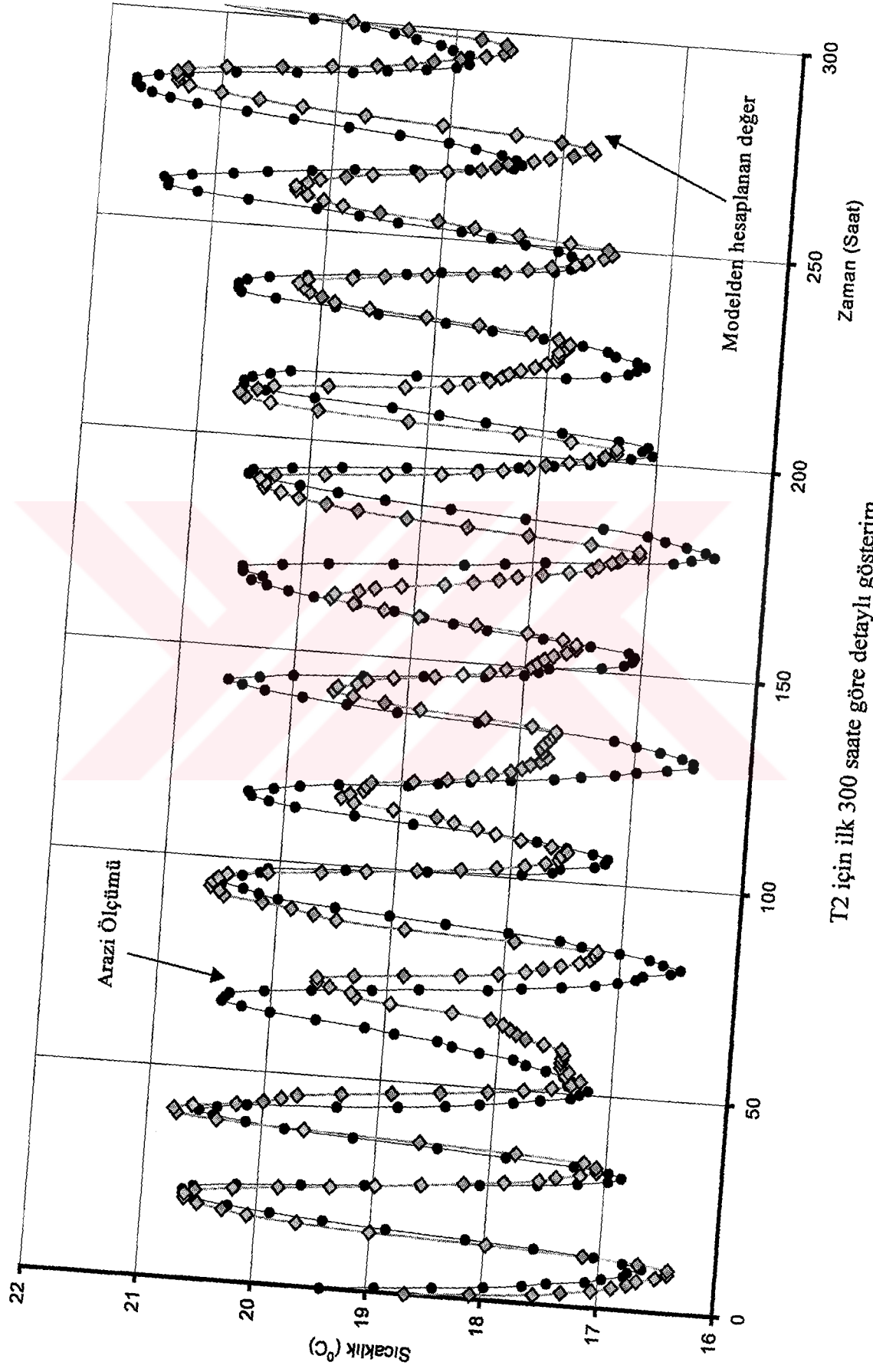
**EK-C. FİLTRELENMİŞ 1 SAATLİK ARALIKLARLA ALINMIŞ DEĞERLERLE,  
YAPILAN İSTATİSTİK MODELİN GRAFİĞİ ve İLK 300 SAATE GÖRE  
DETAYLI GÖSTERİMİ**



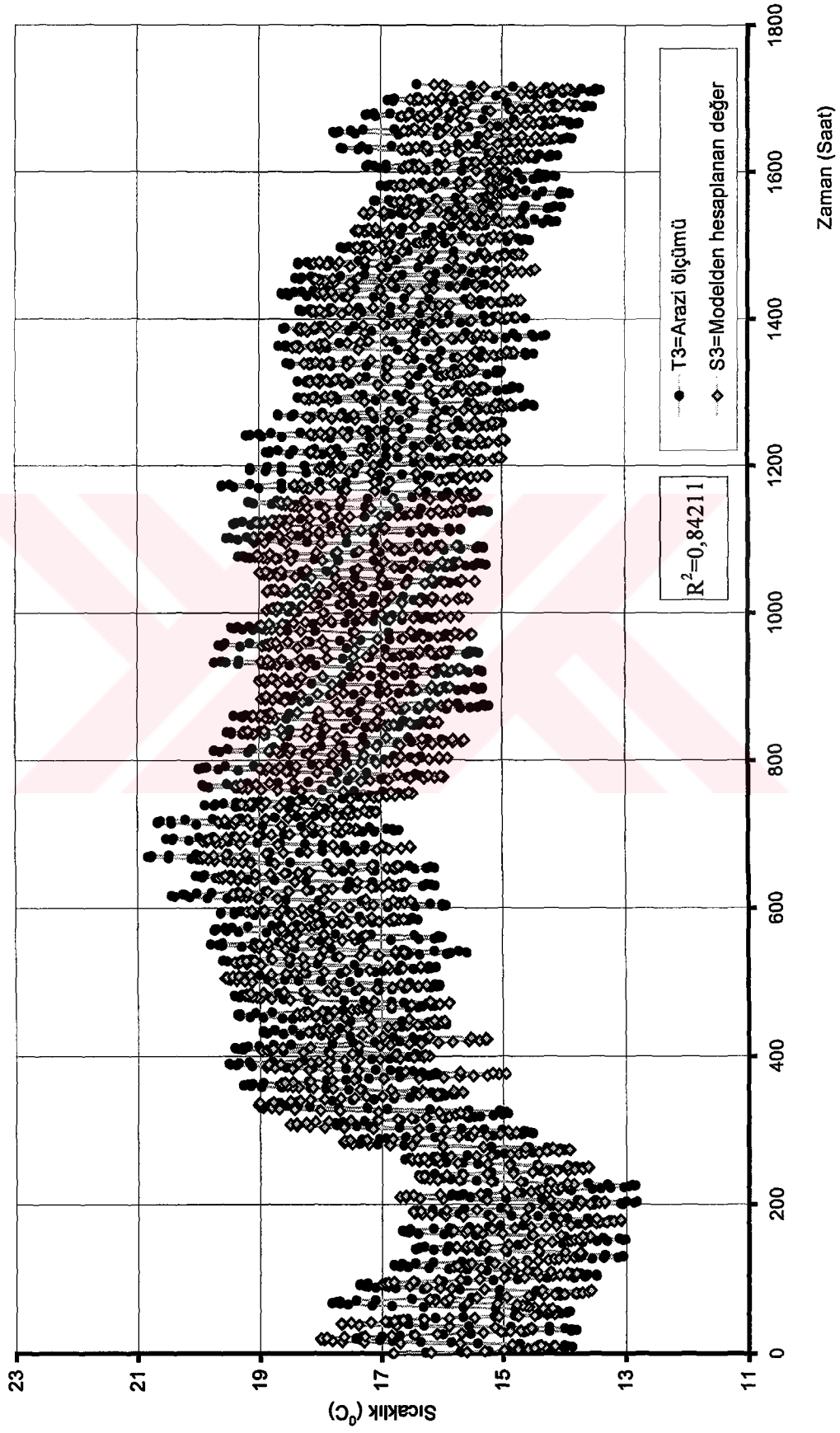




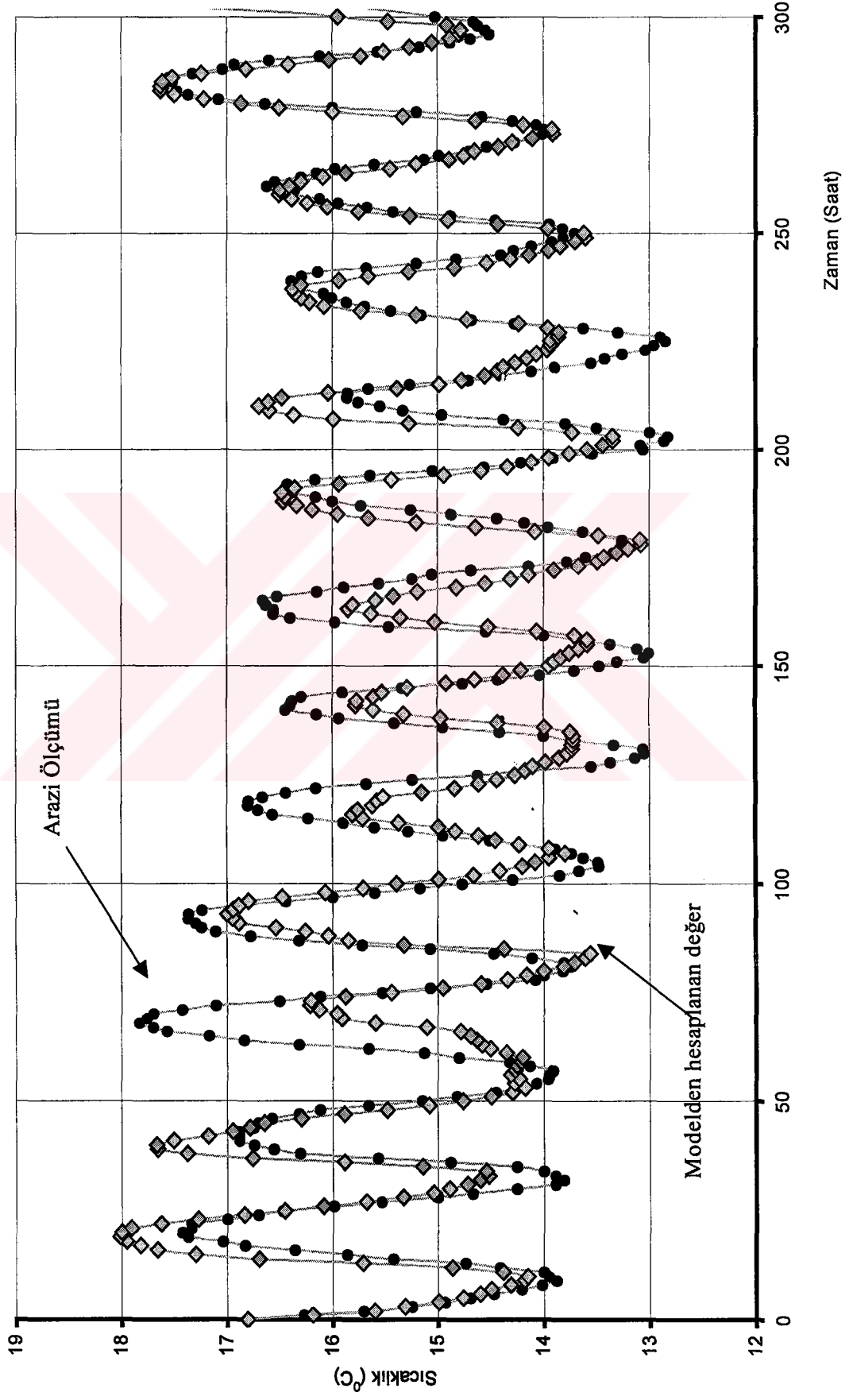
T2 için istatistiksel modele ait grafik



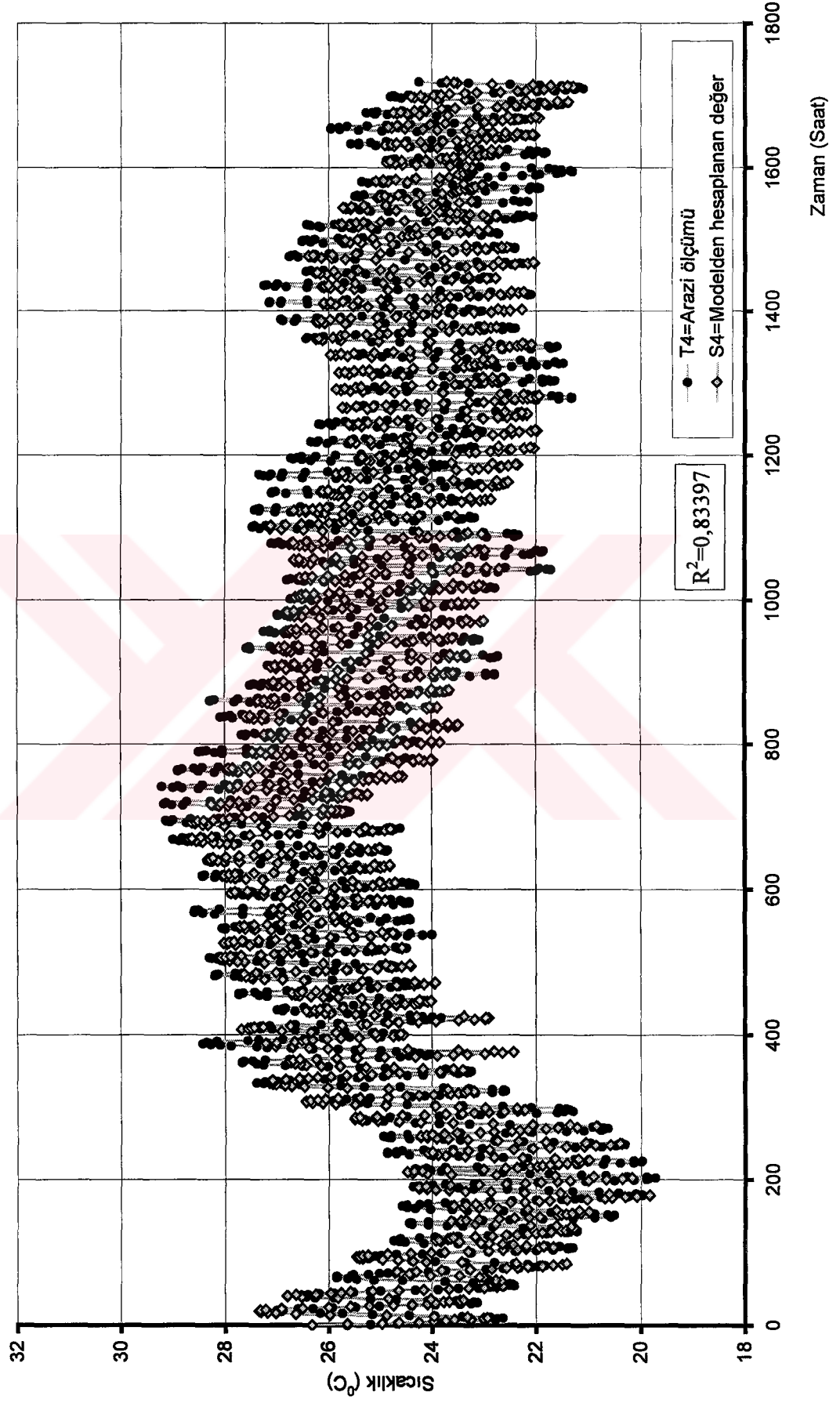
T2 için ilk 300 saate göre detaylı gösterim



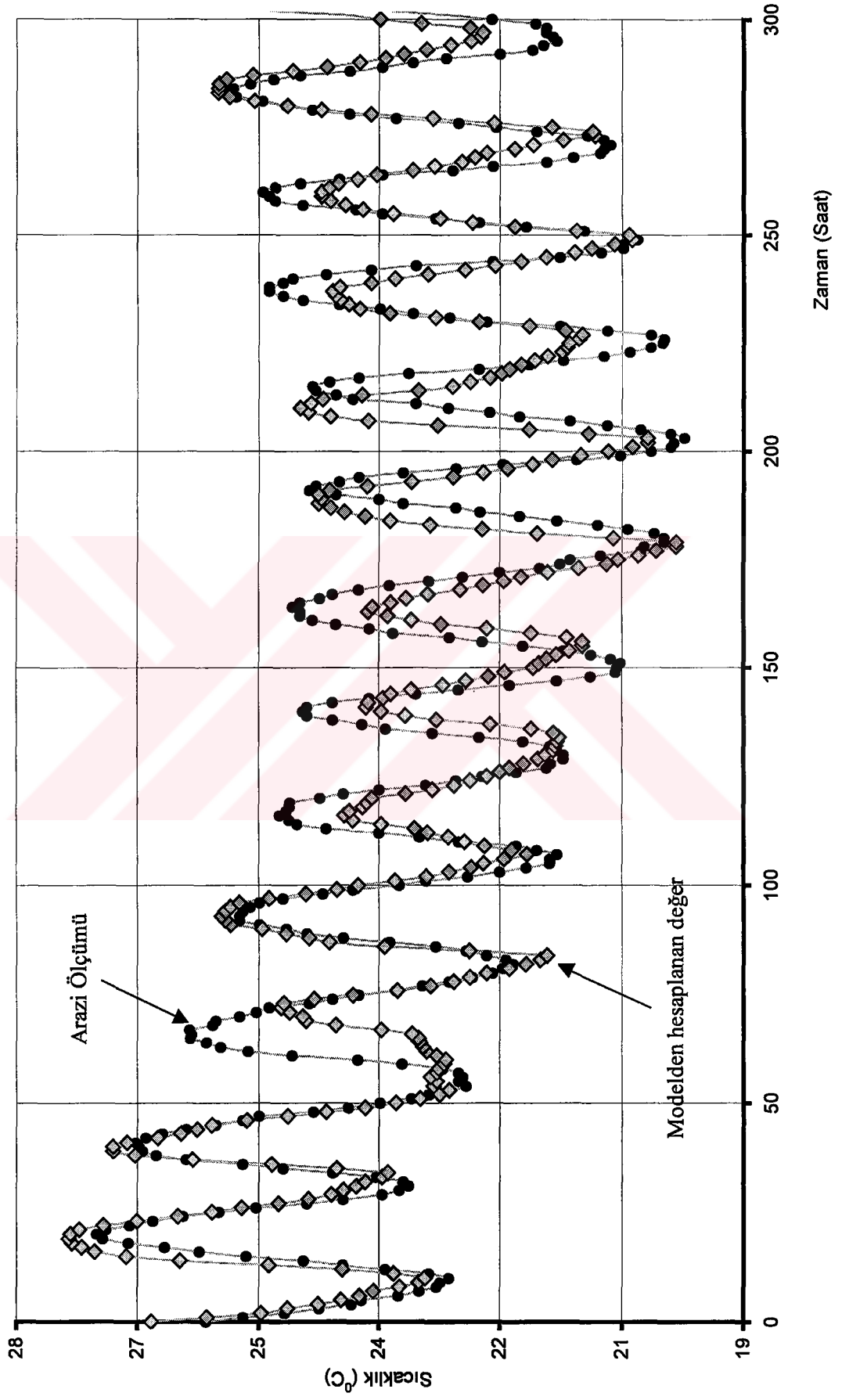
T3 için istatistiksel modele ait grafik



T3 için ilk 300 saate göre detaylı gösterim

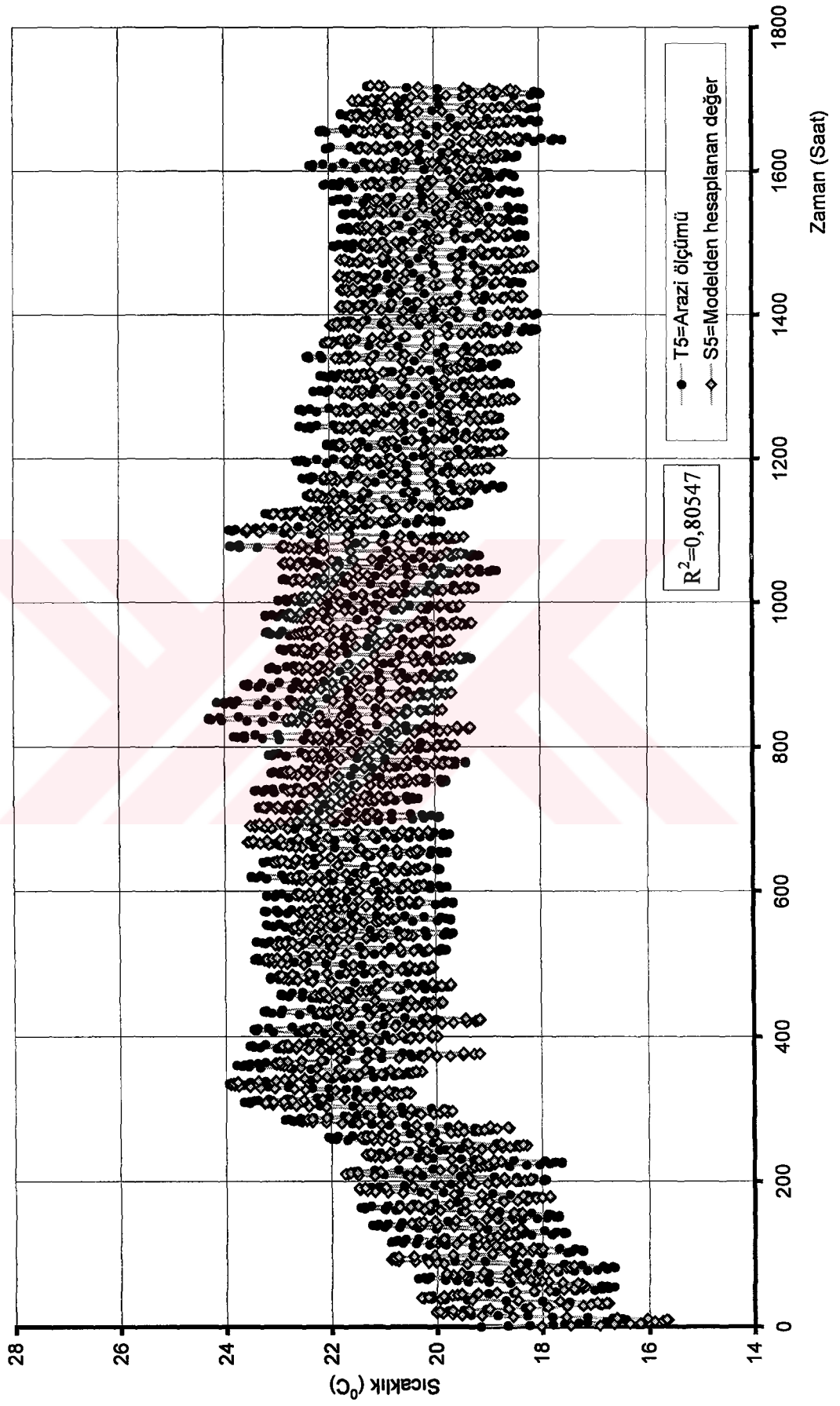


T4 için istatistiksel modele ait grafik



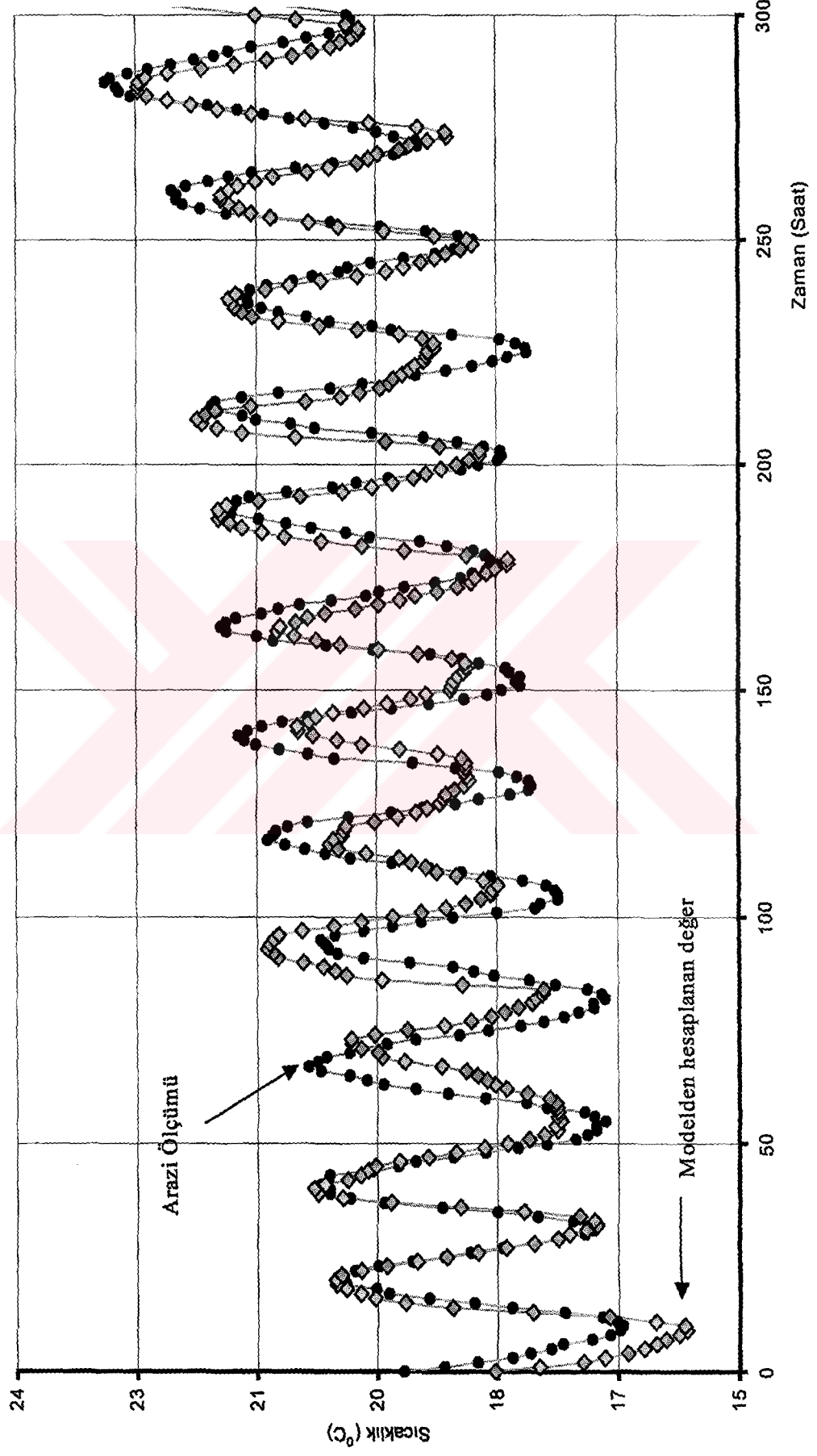
T4 için ilk 300 saate göre detaylı gösterim



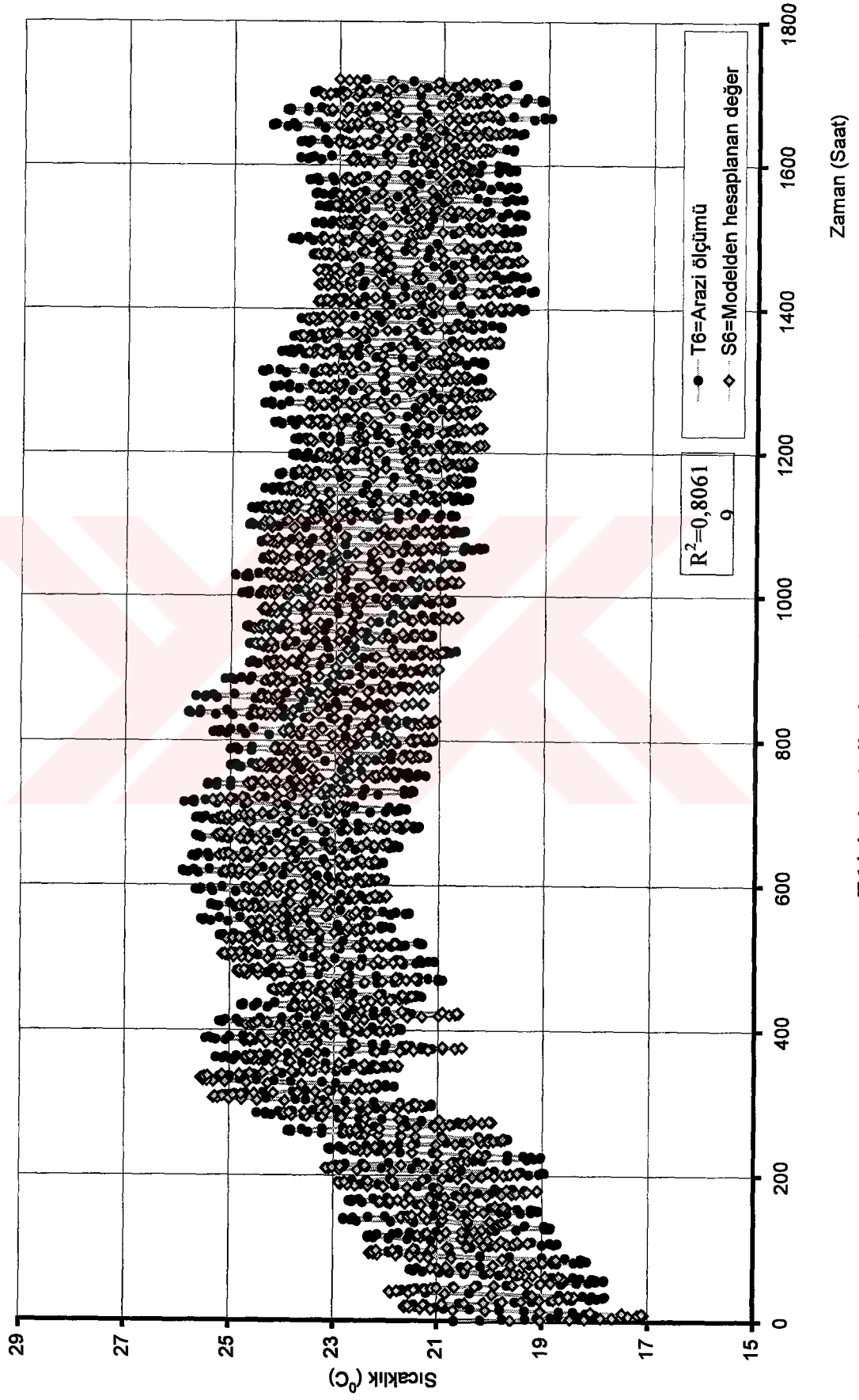


T5 için istatistiksel modele ait grafik

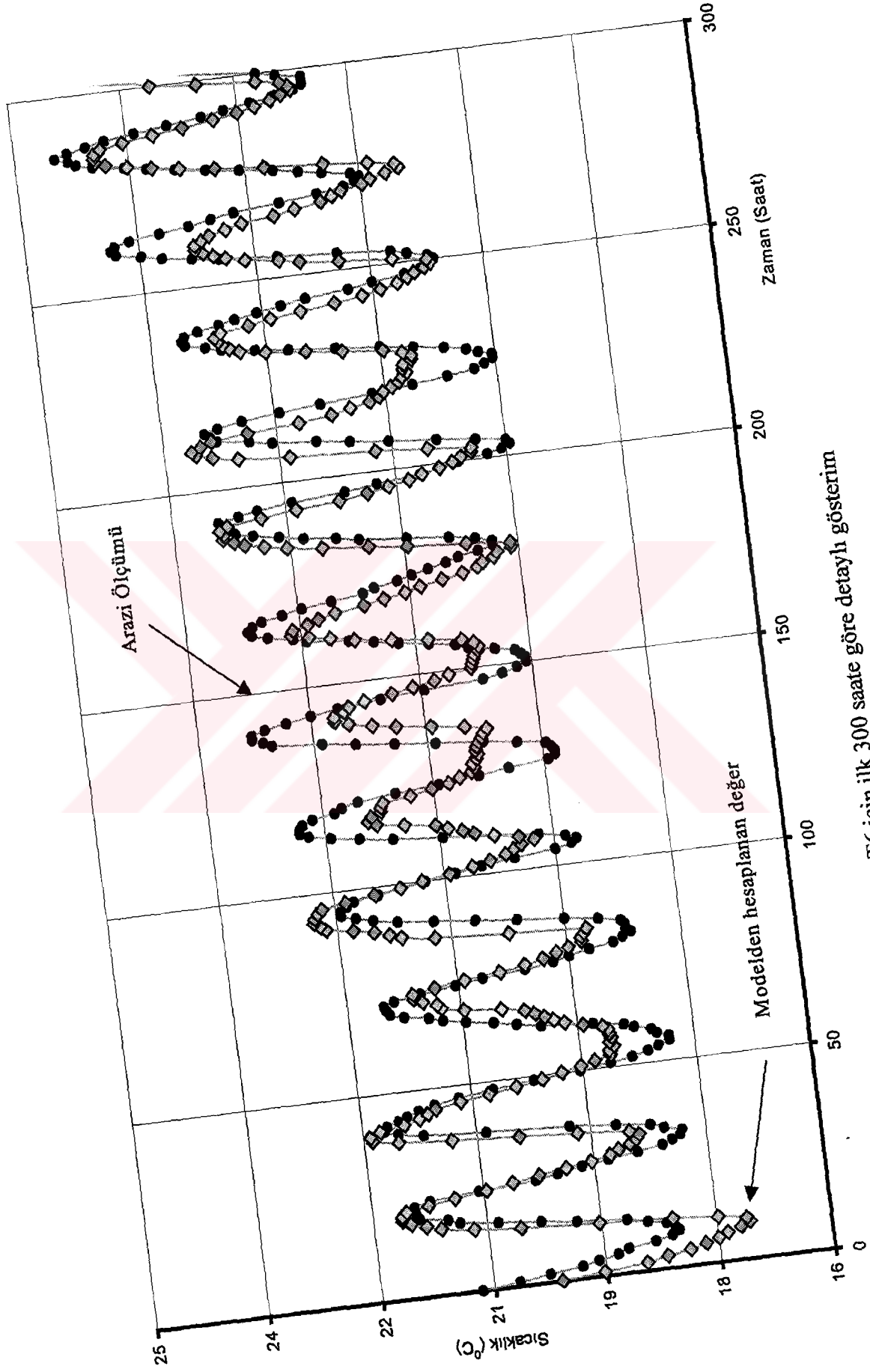


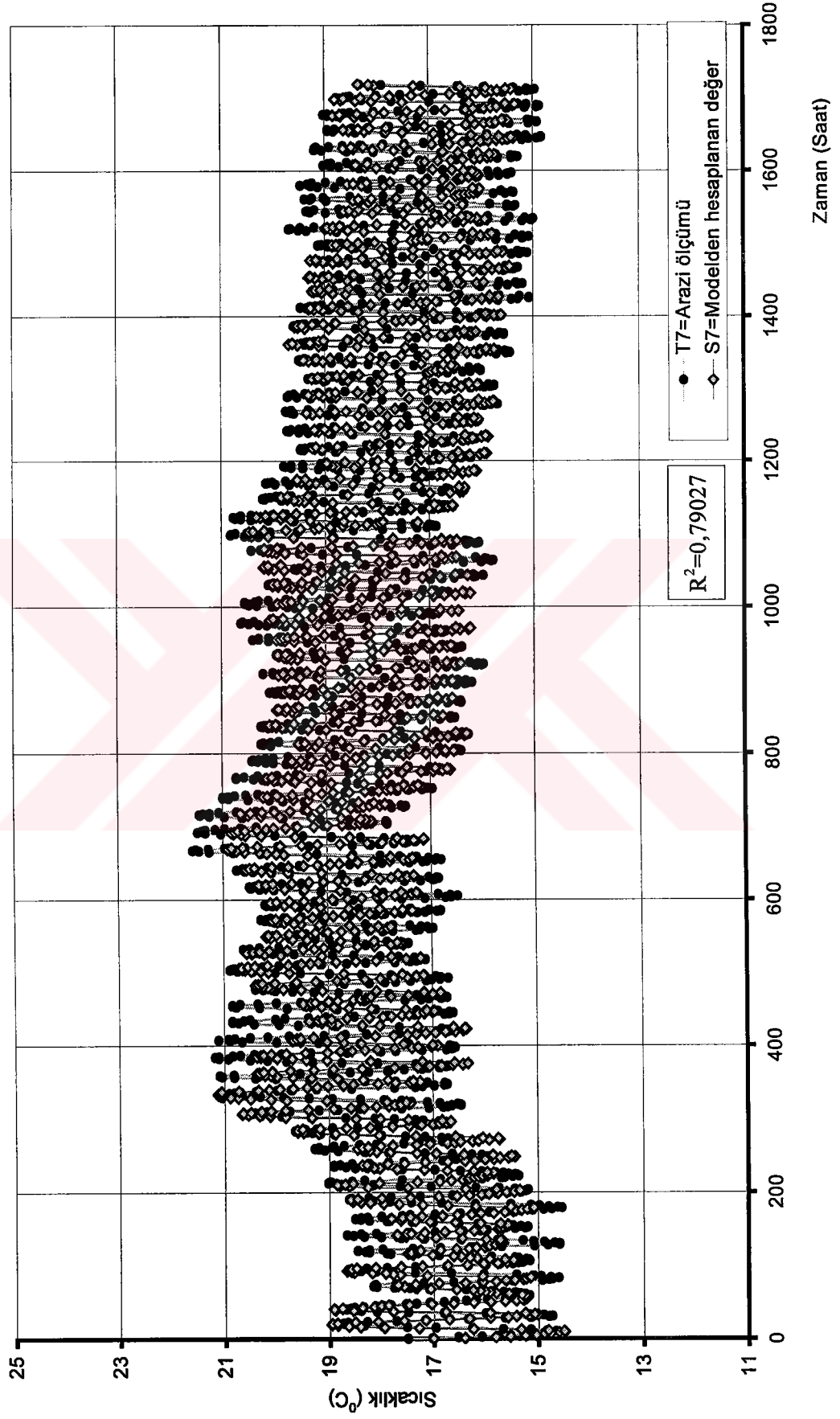


T5 için ilk 300 saate göre detaylı gösterim

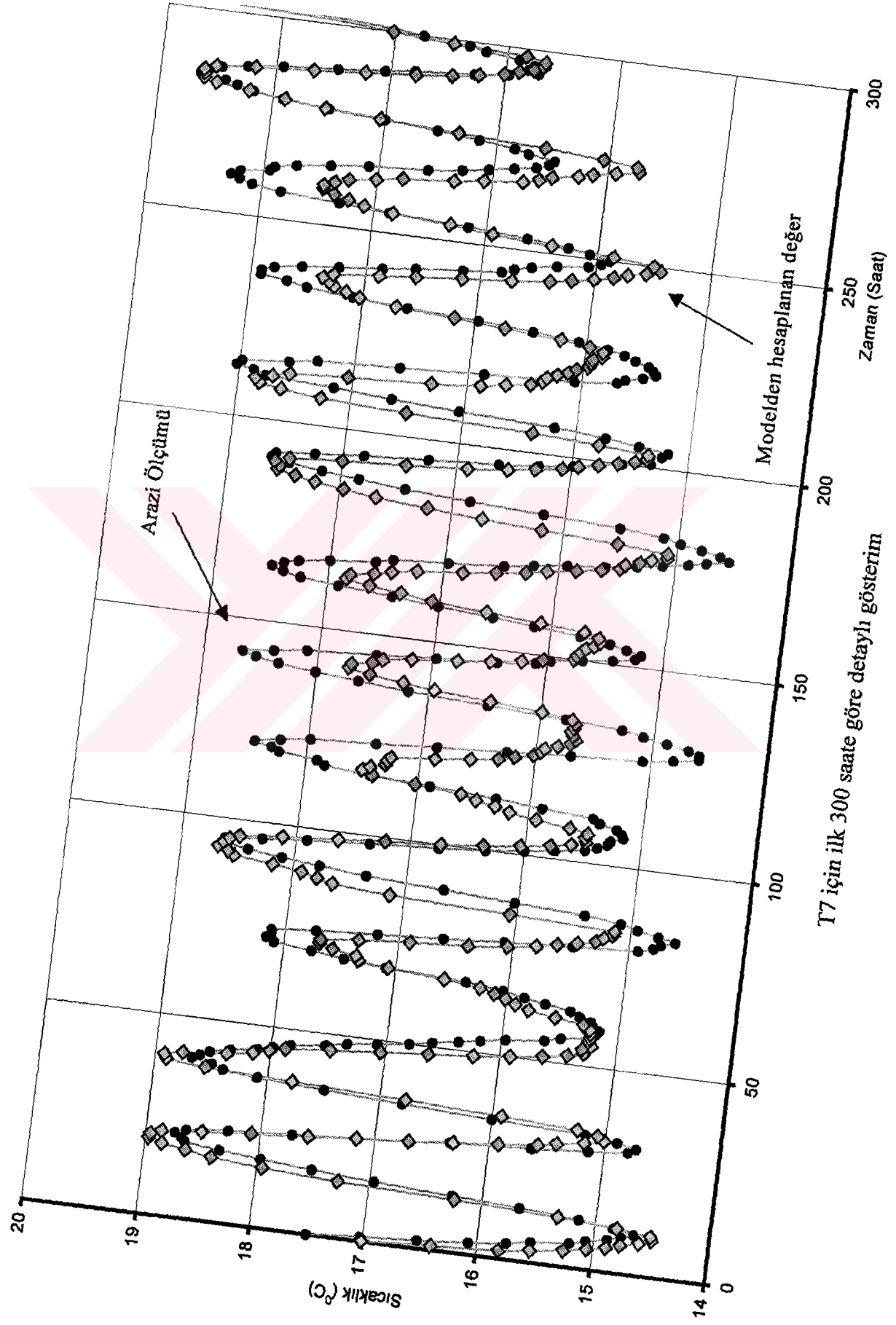


T6 için istatistiksel modele ait grafik

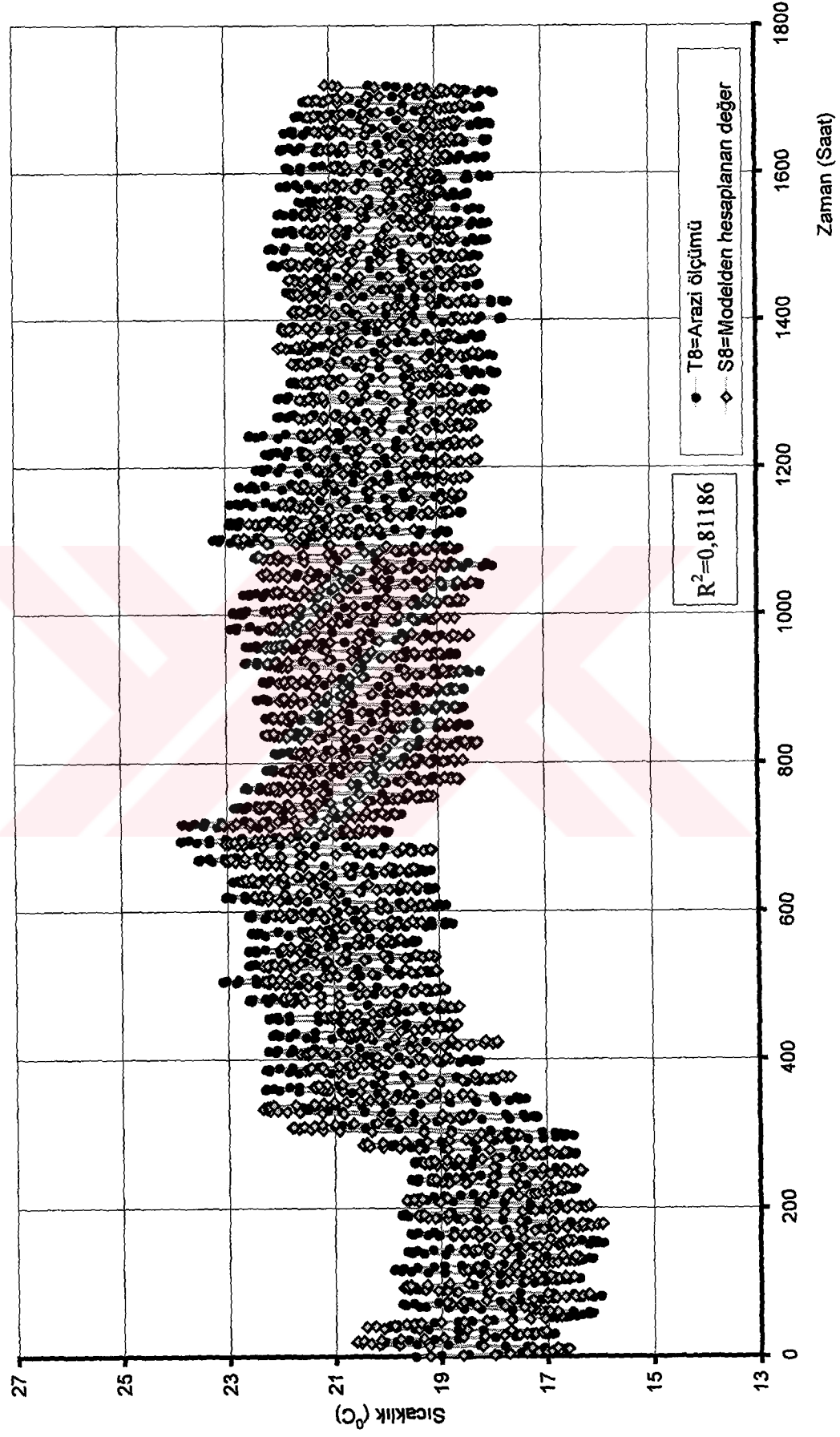




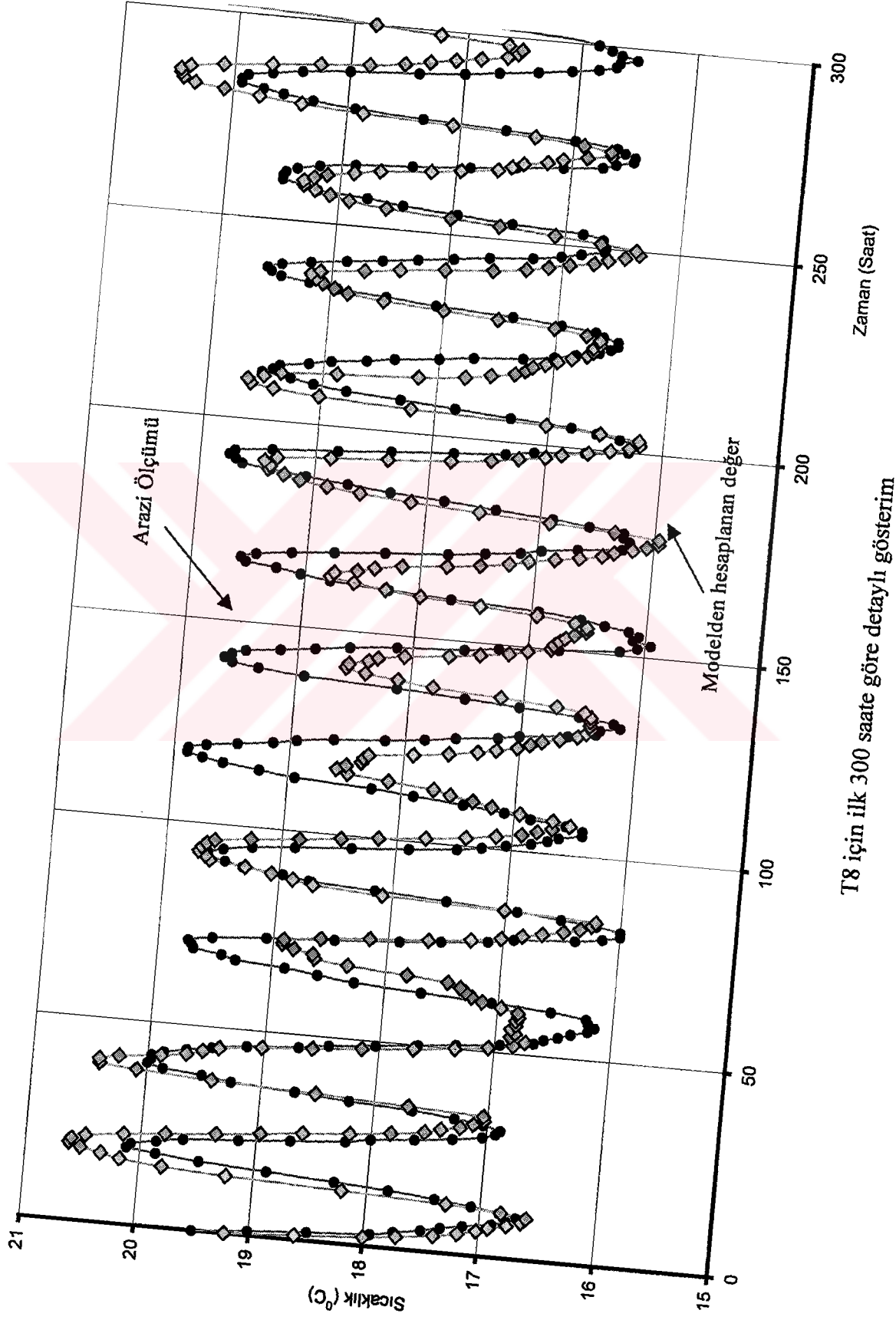
T7 için istatistiksel modele ait grafik





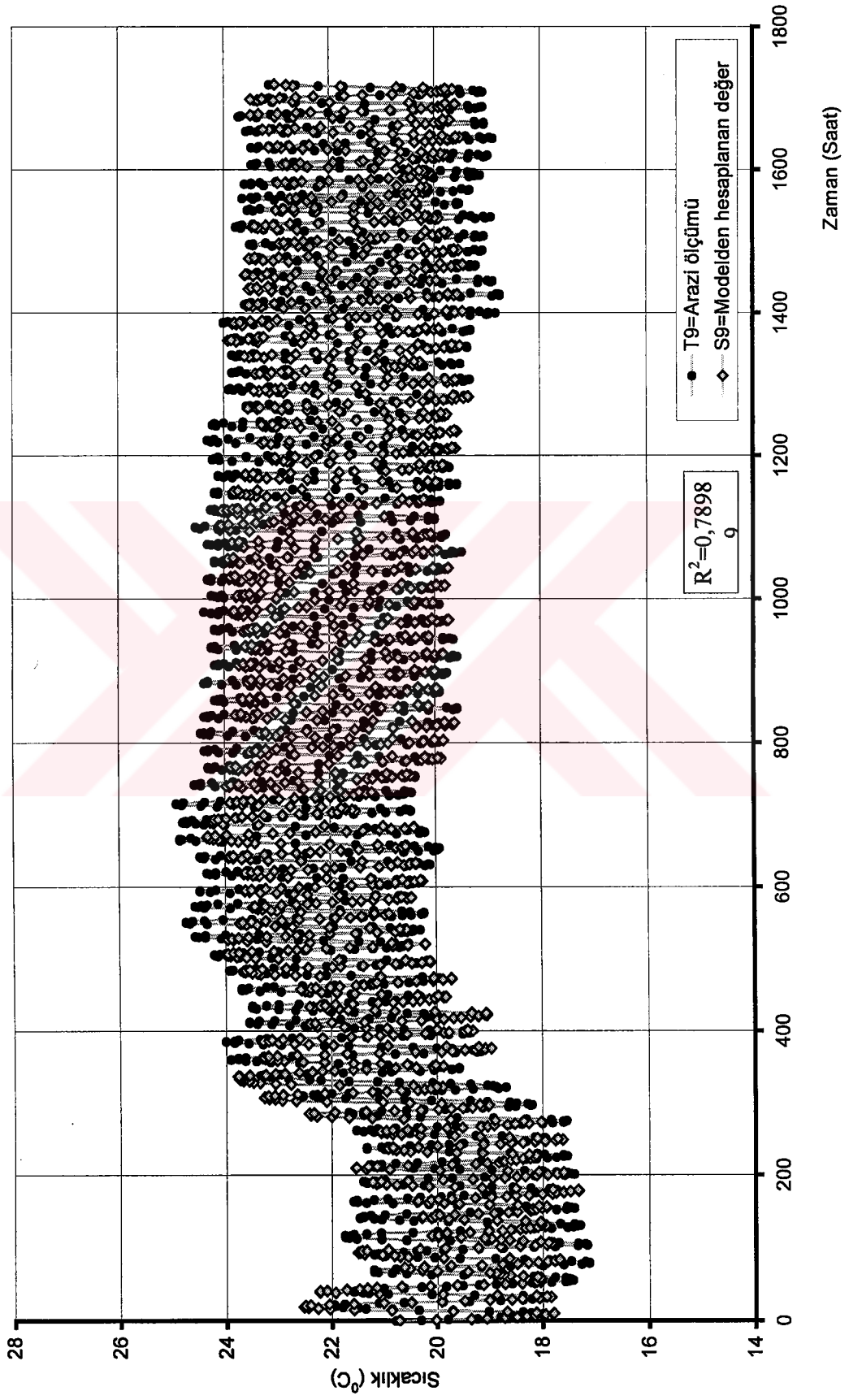


T8 için istatistiksel modele ait grafik

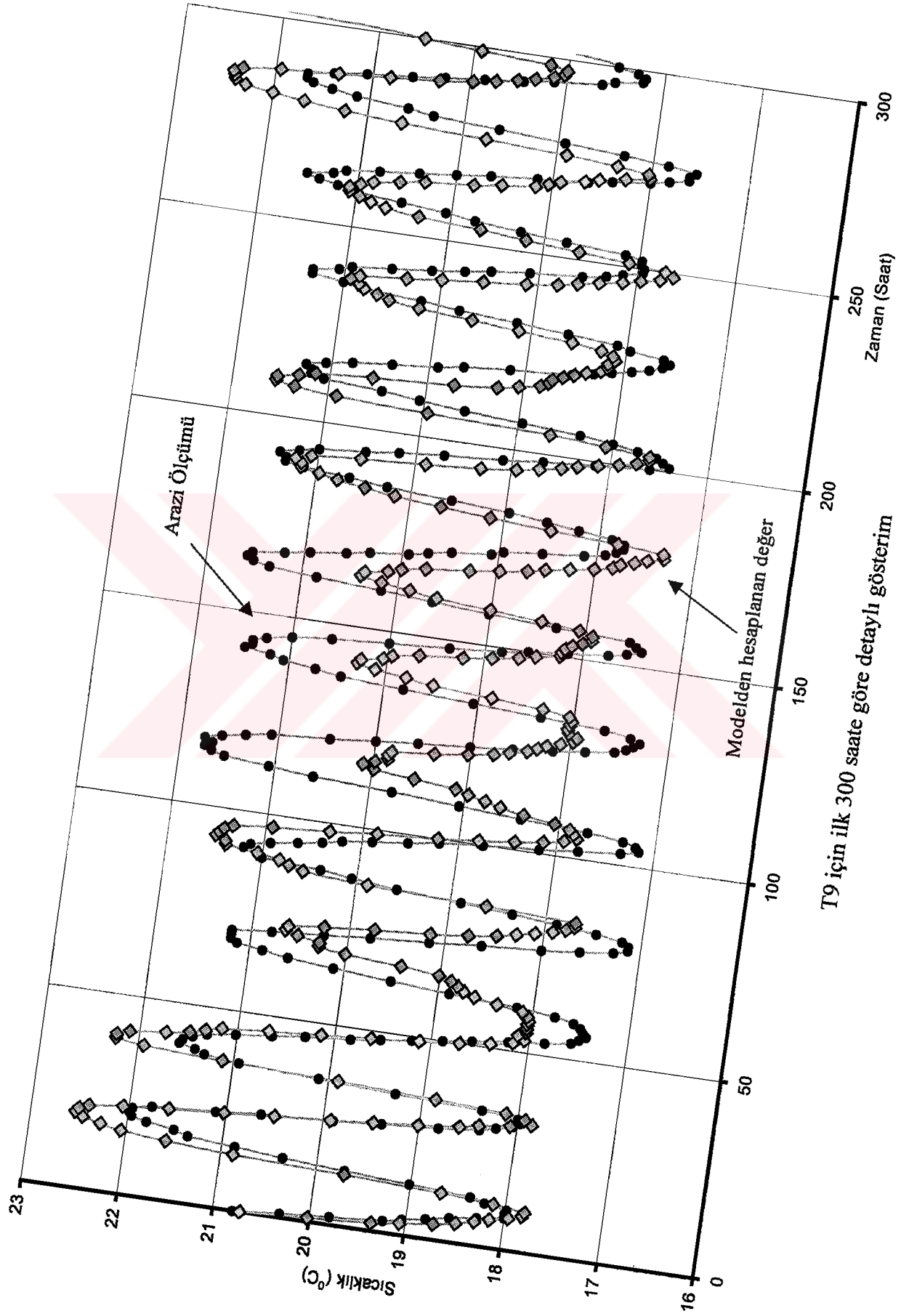


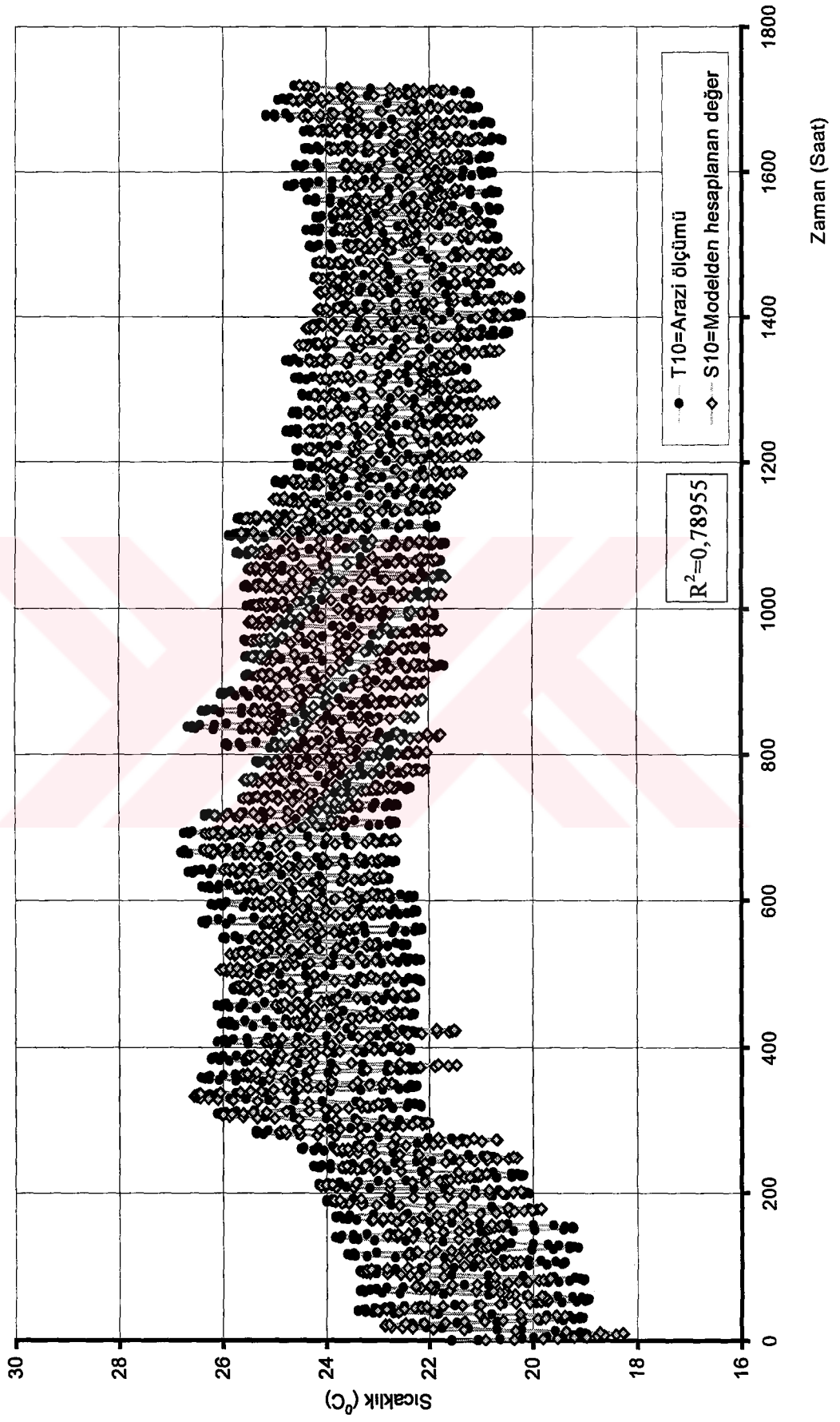
T8 için ilk 300 saate göre detaylı gösterim



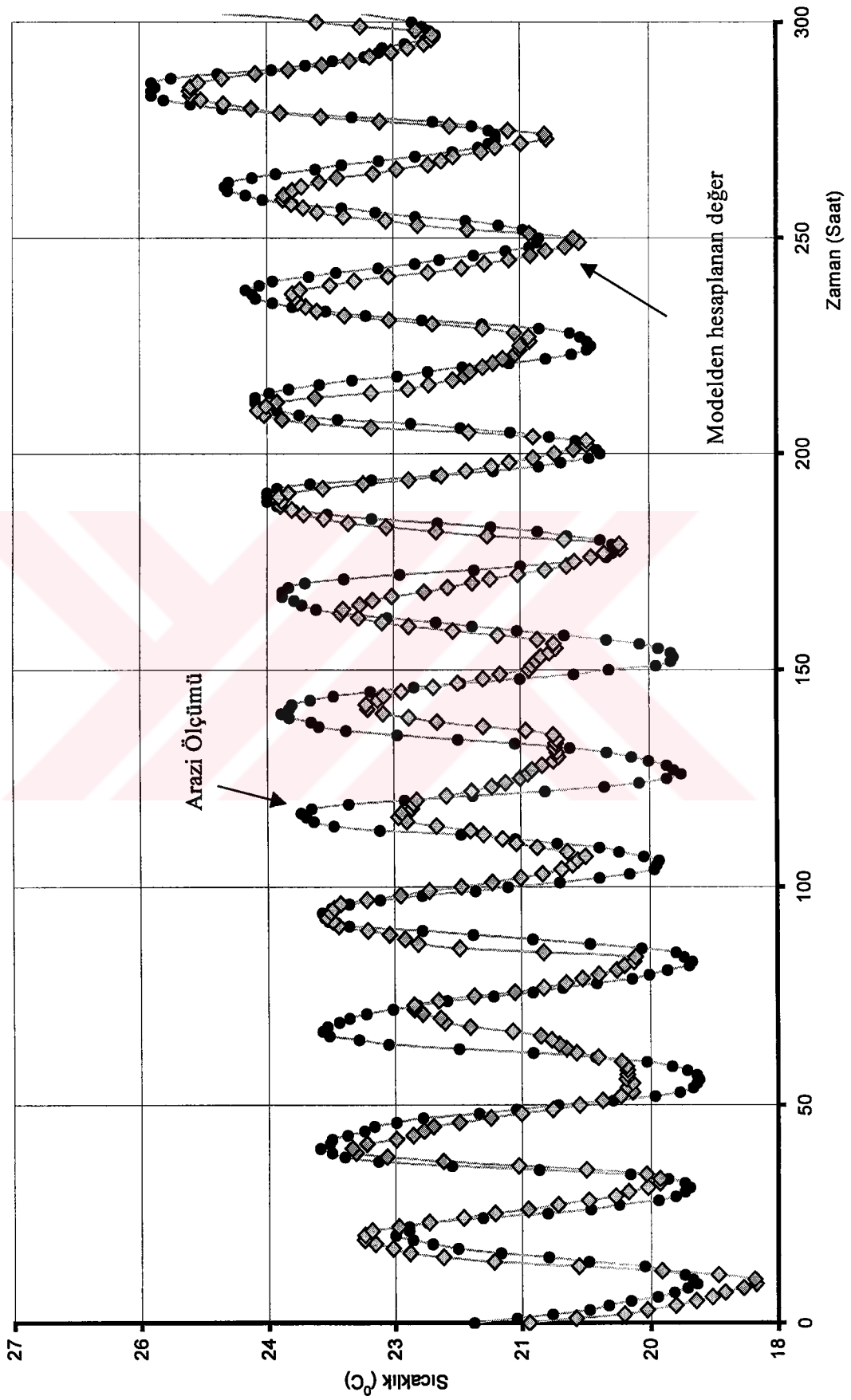


T9 için istatistiksel modele ait grafik

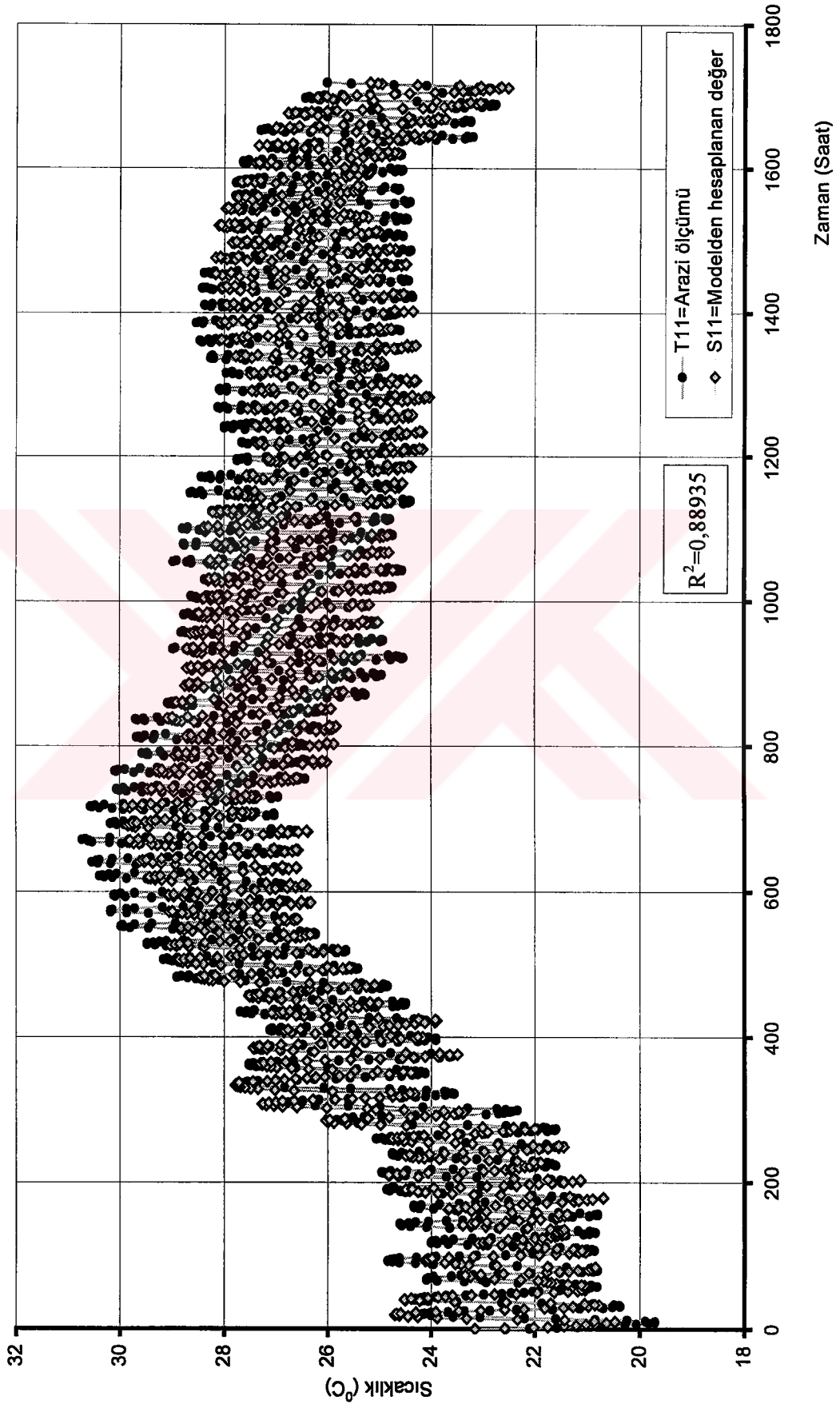




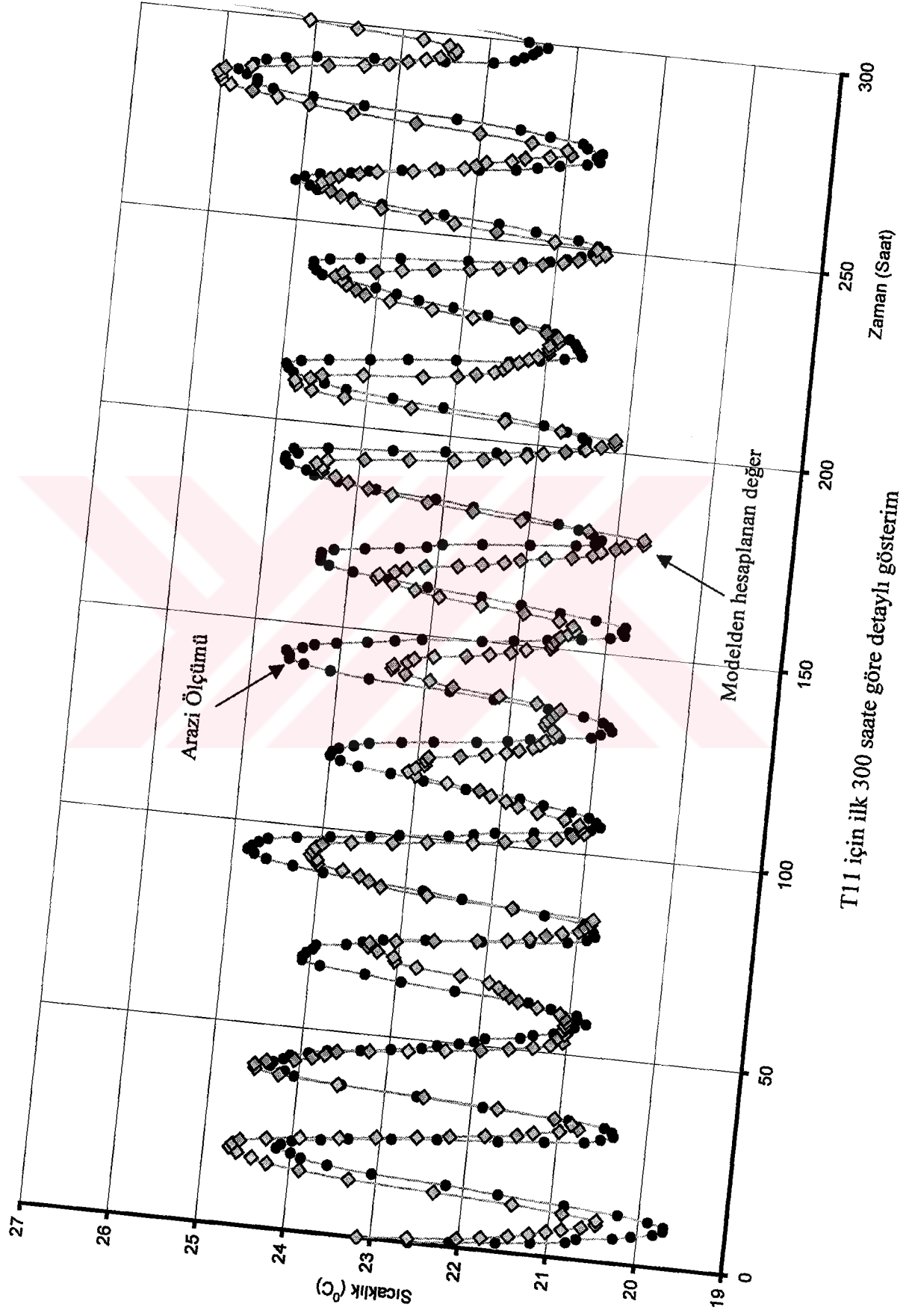
T10 için istatistiksel modele ait grafik



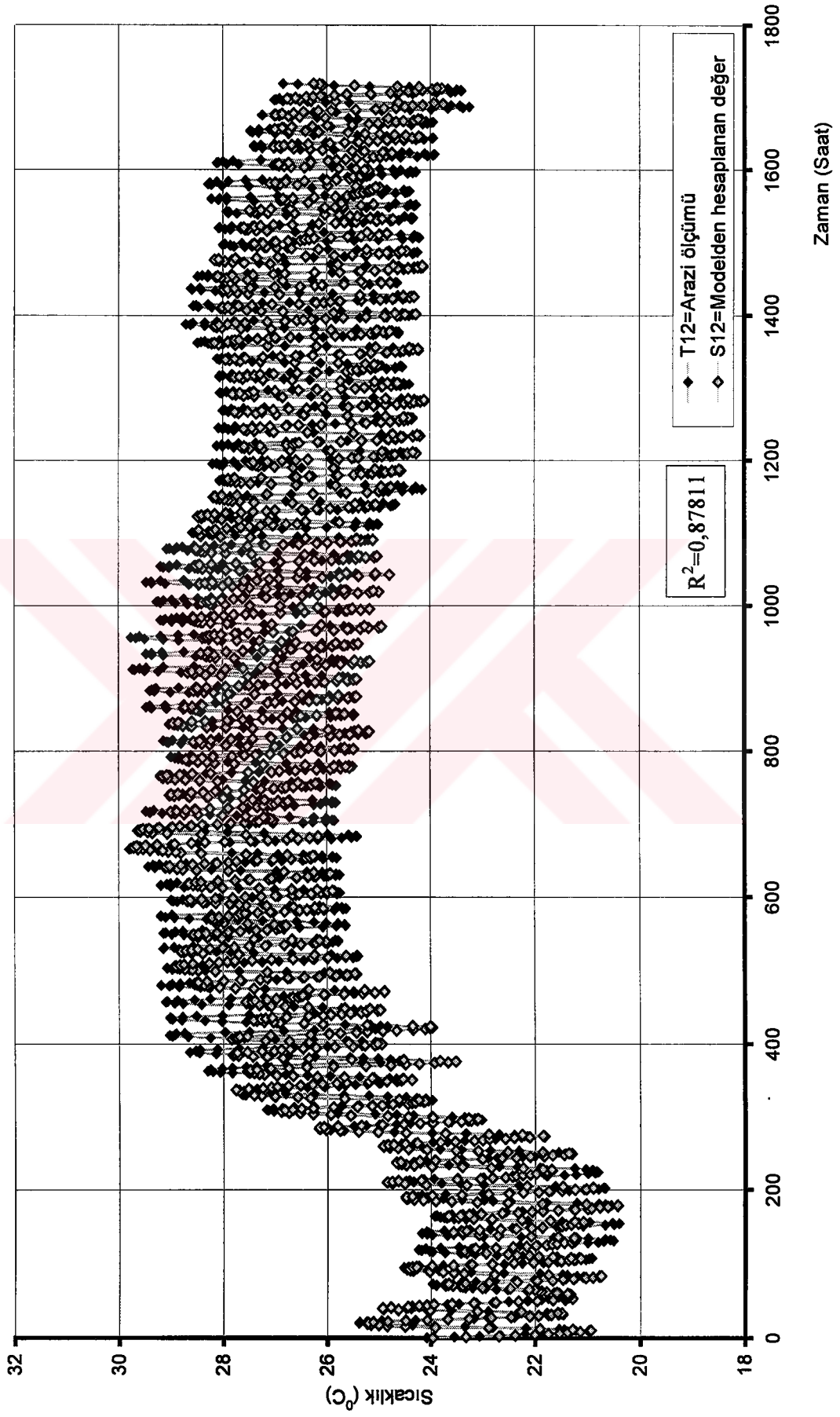
T10 için ilk 300 saate göre detaylı gösterim



T11 için istatistiksel modele ait grafik

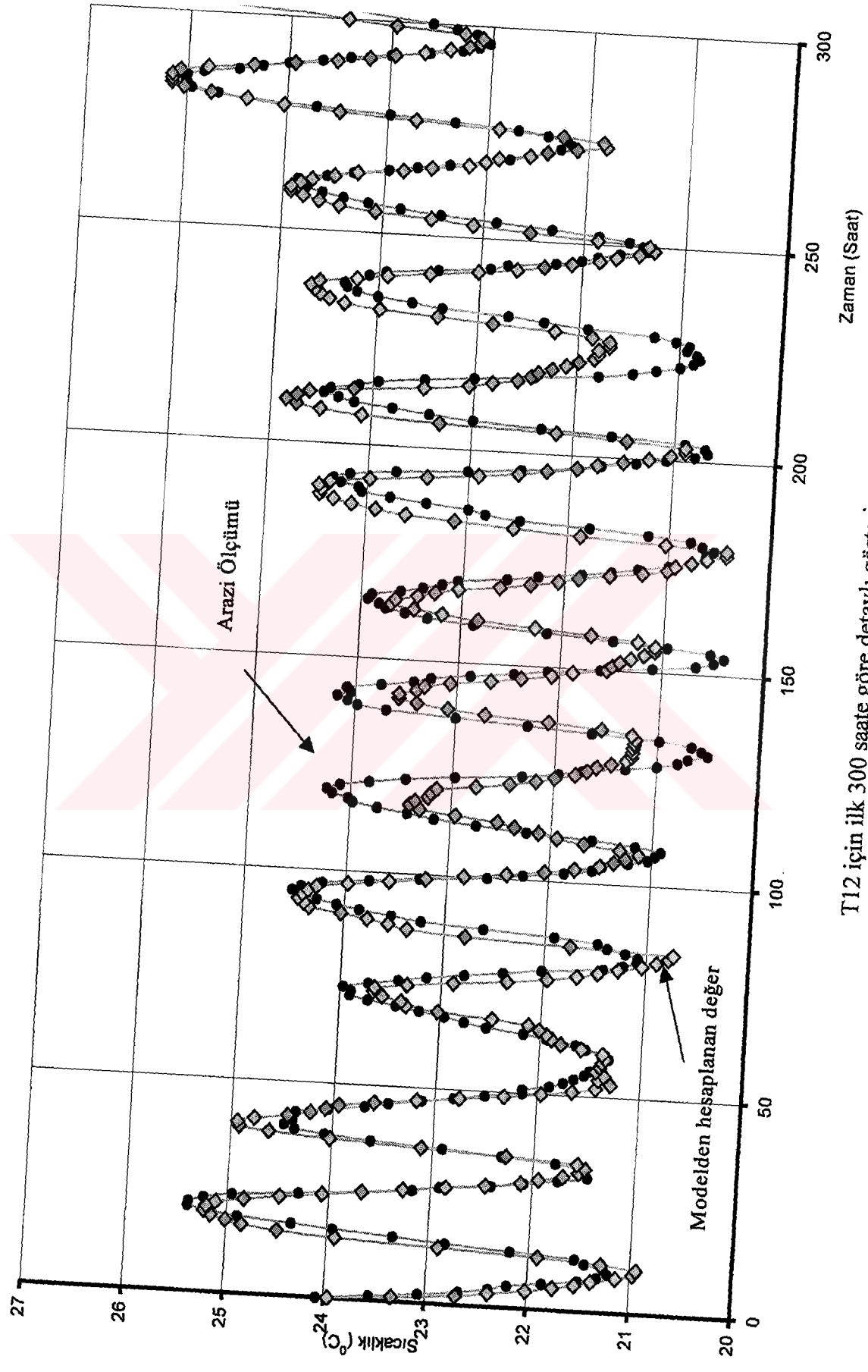




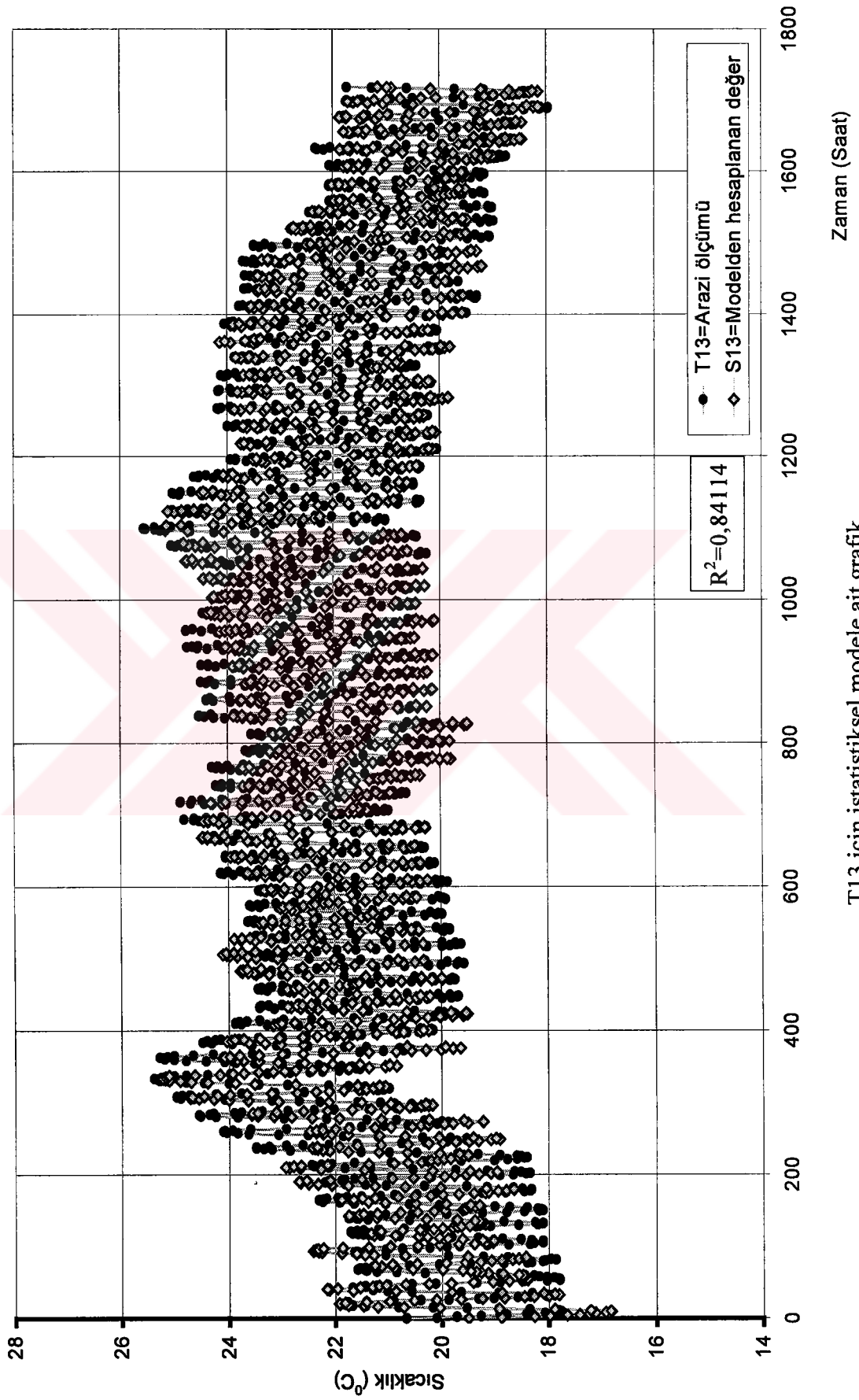


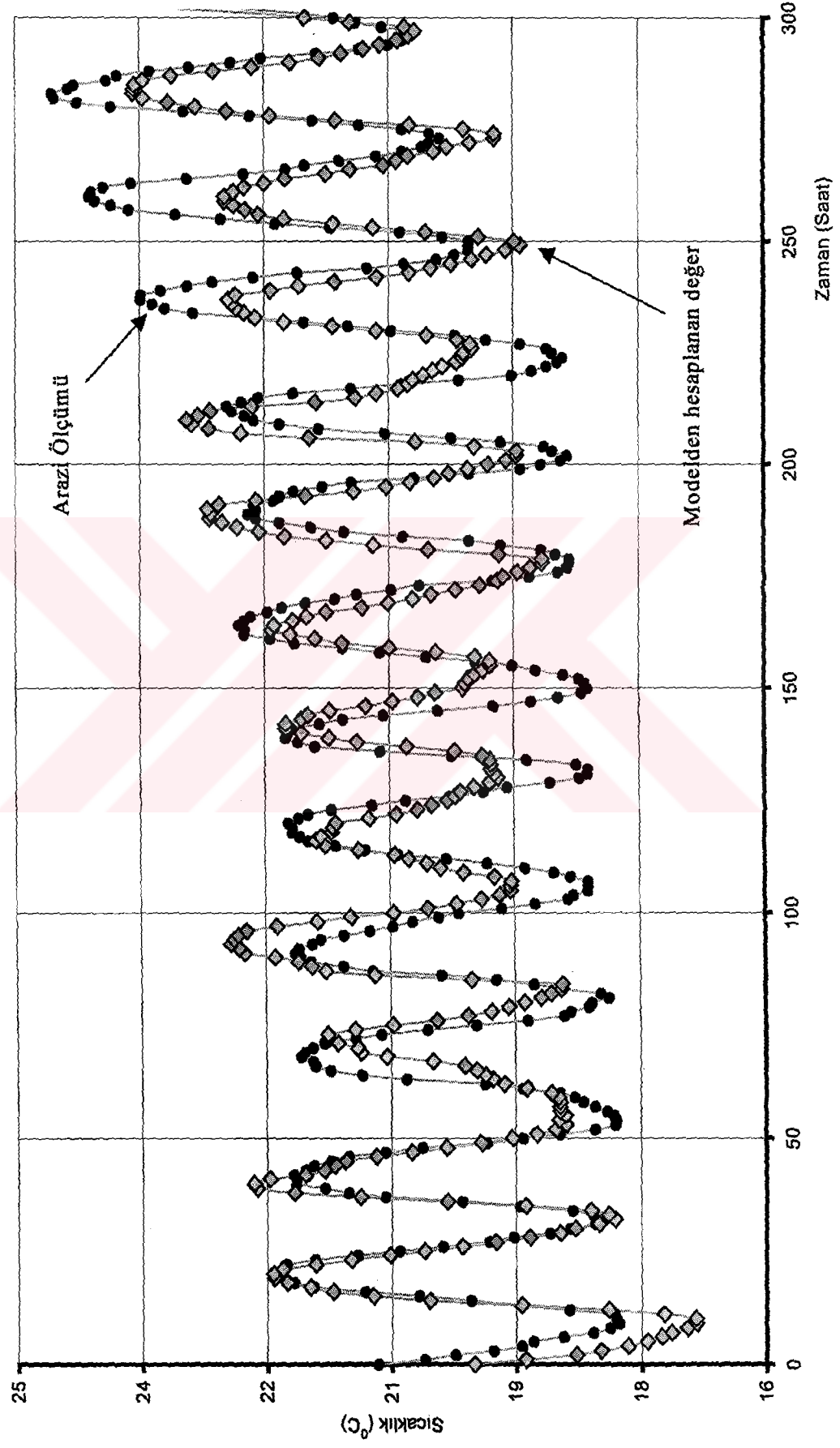
T12 için istatistiksel modele ait grafik



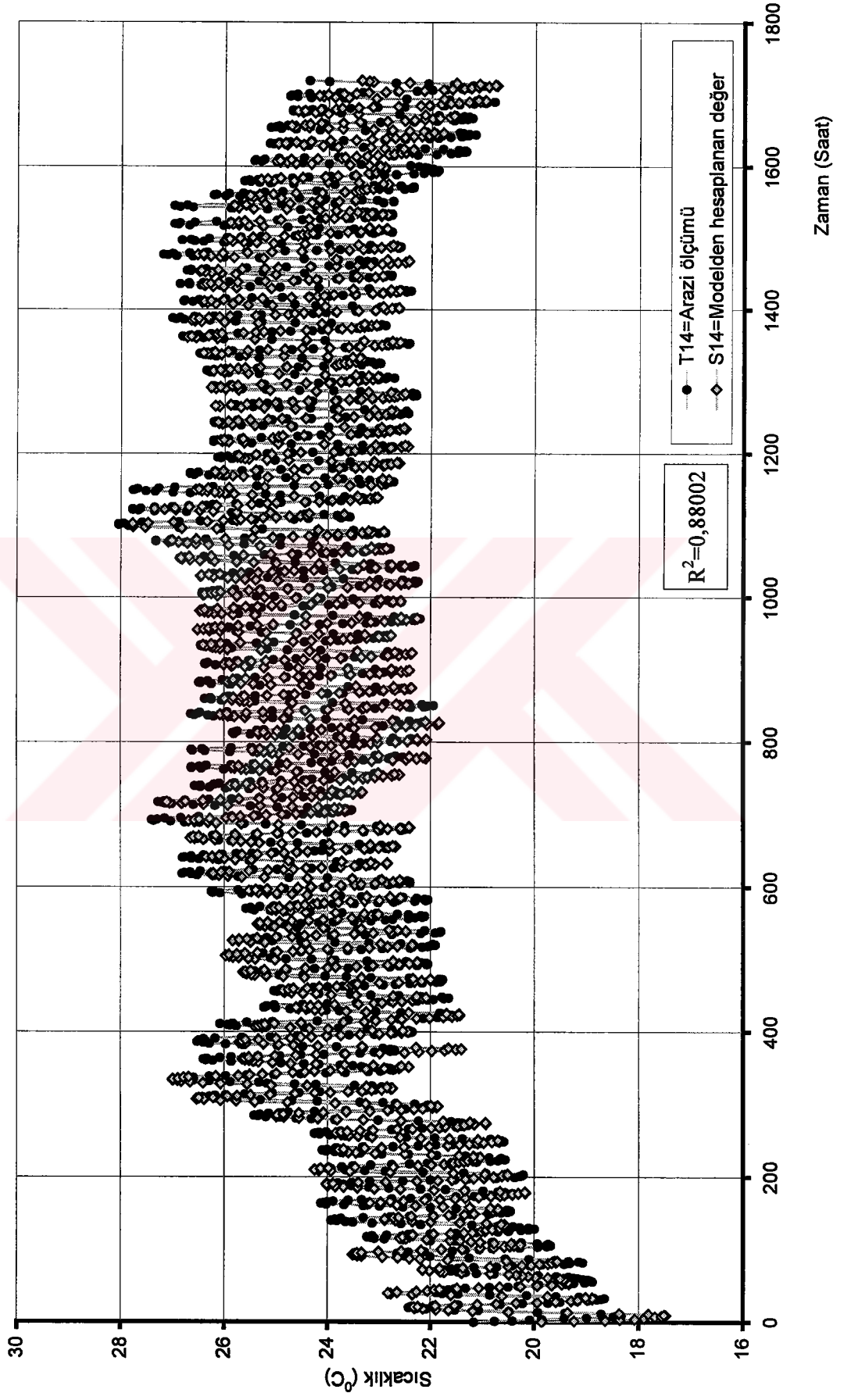


T12 için ilk 300 saate göre detaylı gösterim

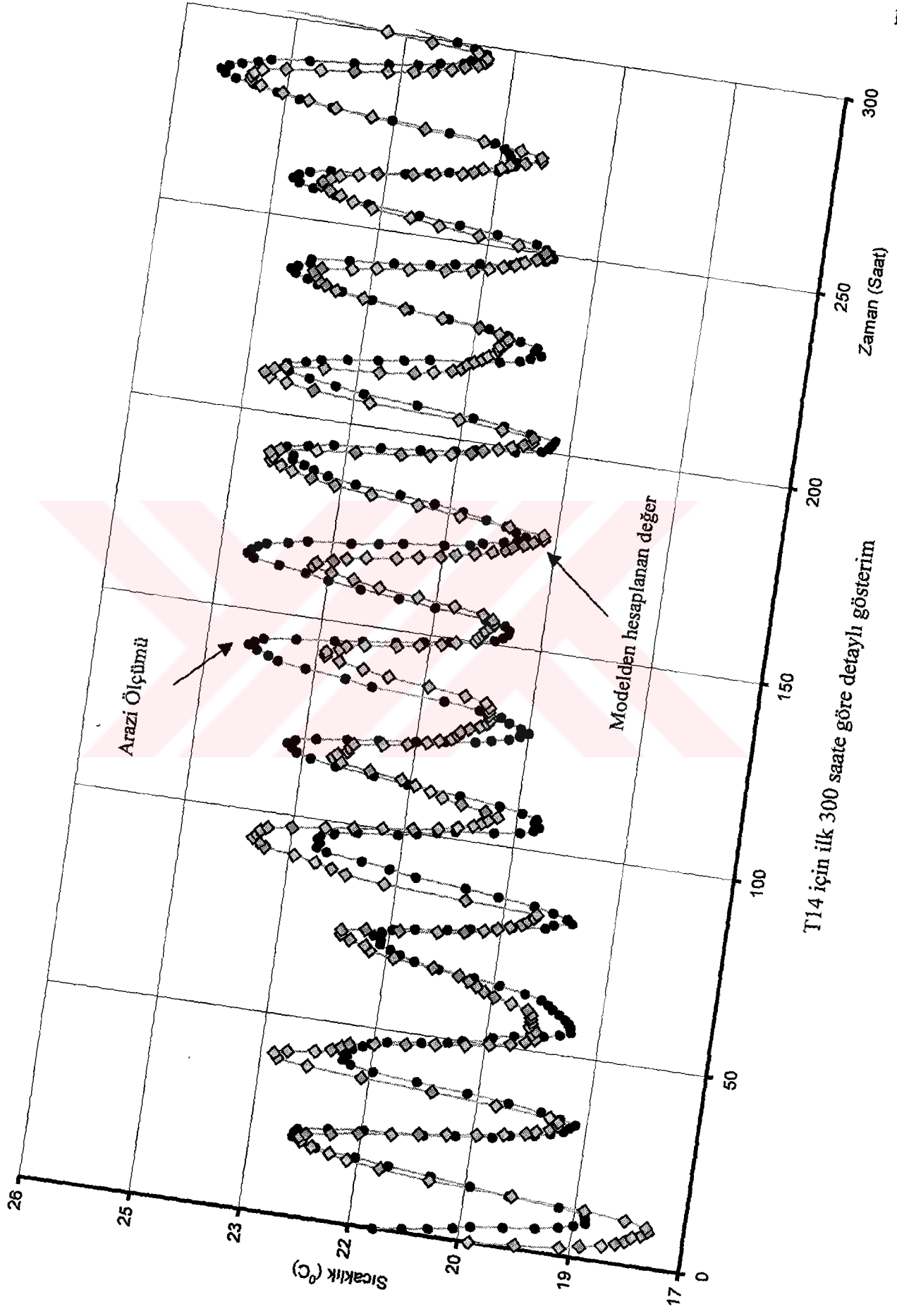




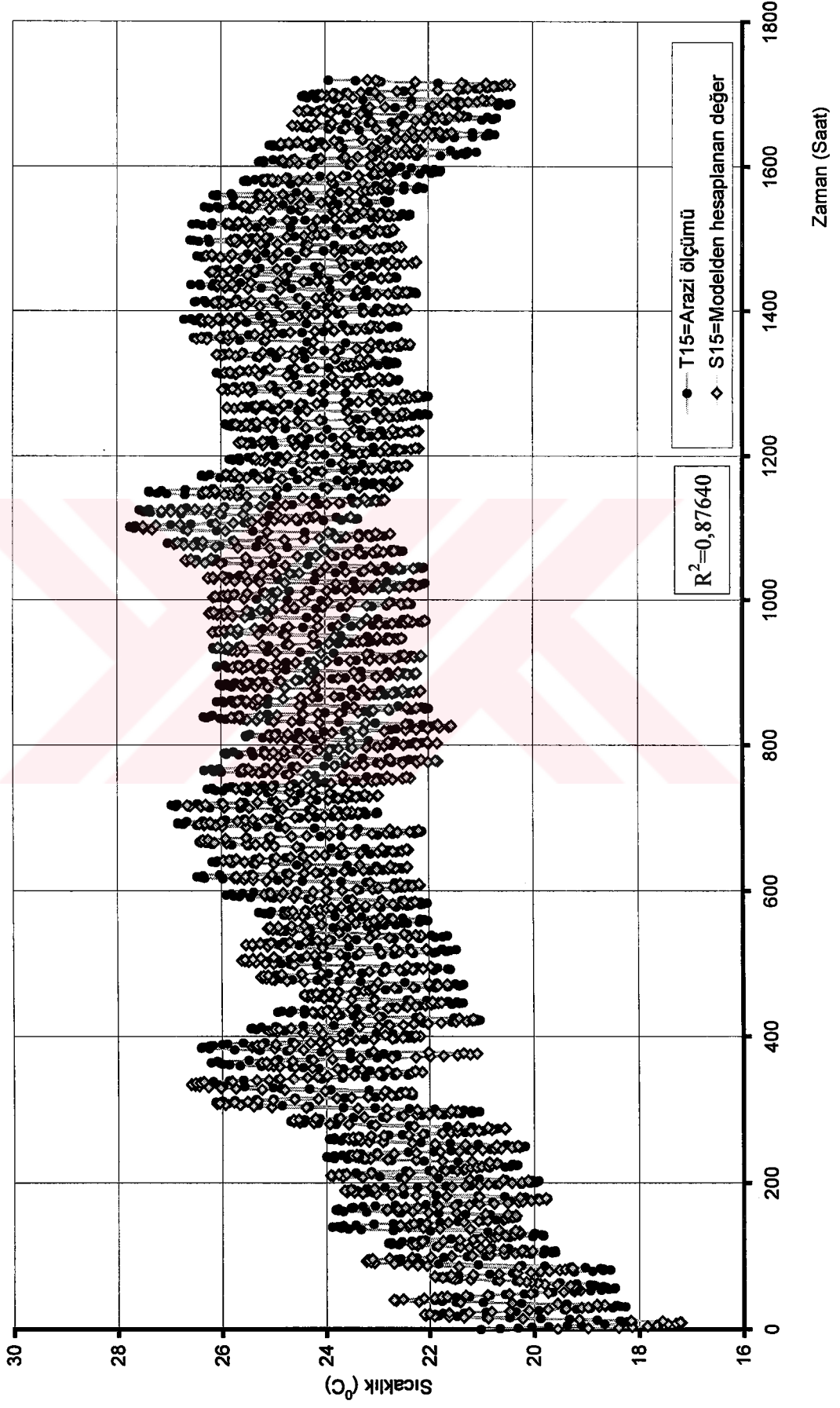
T13 için ilk 300 saate göre detaylı gösterim



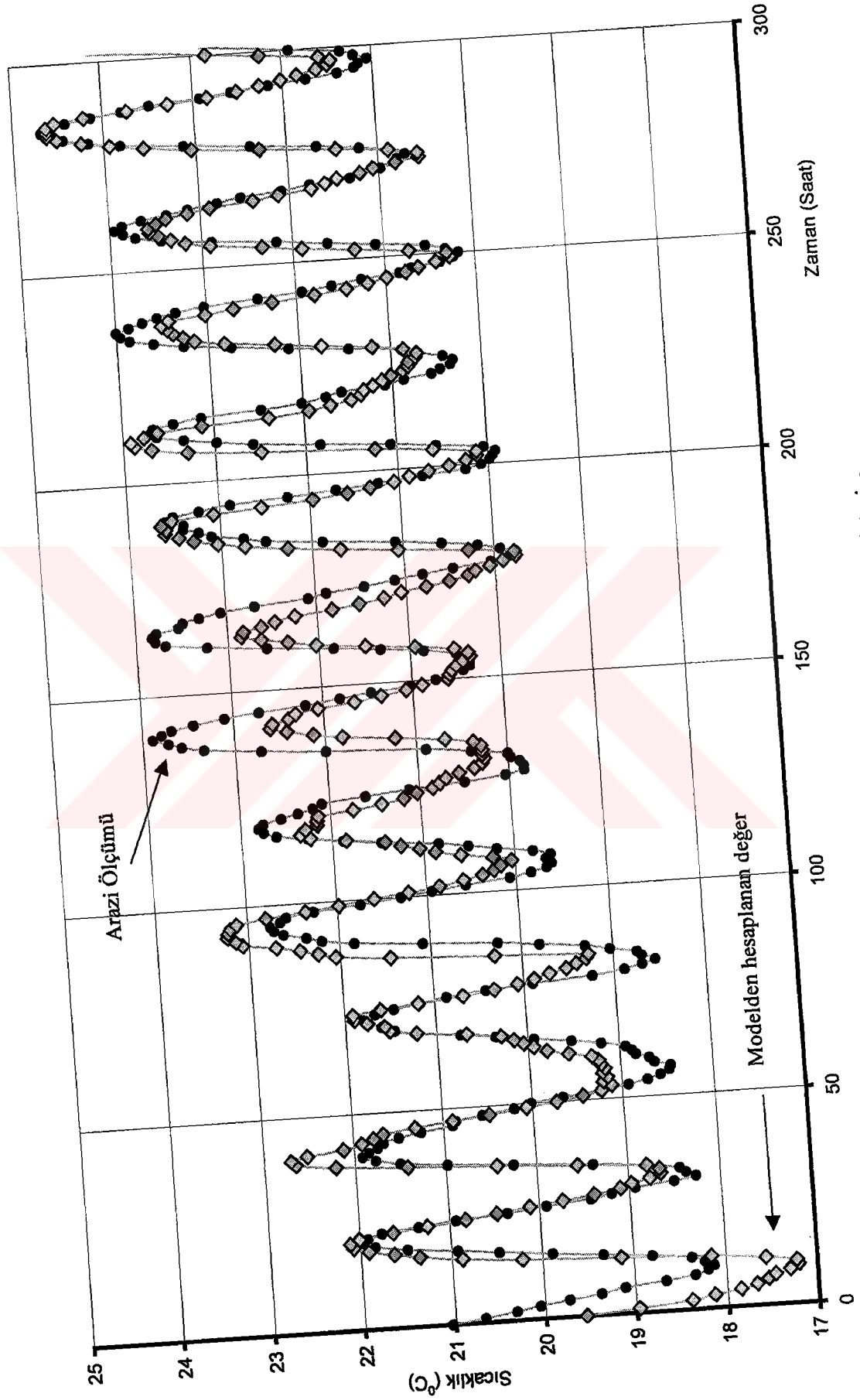
T14 için istatistiksel modele ait grafik





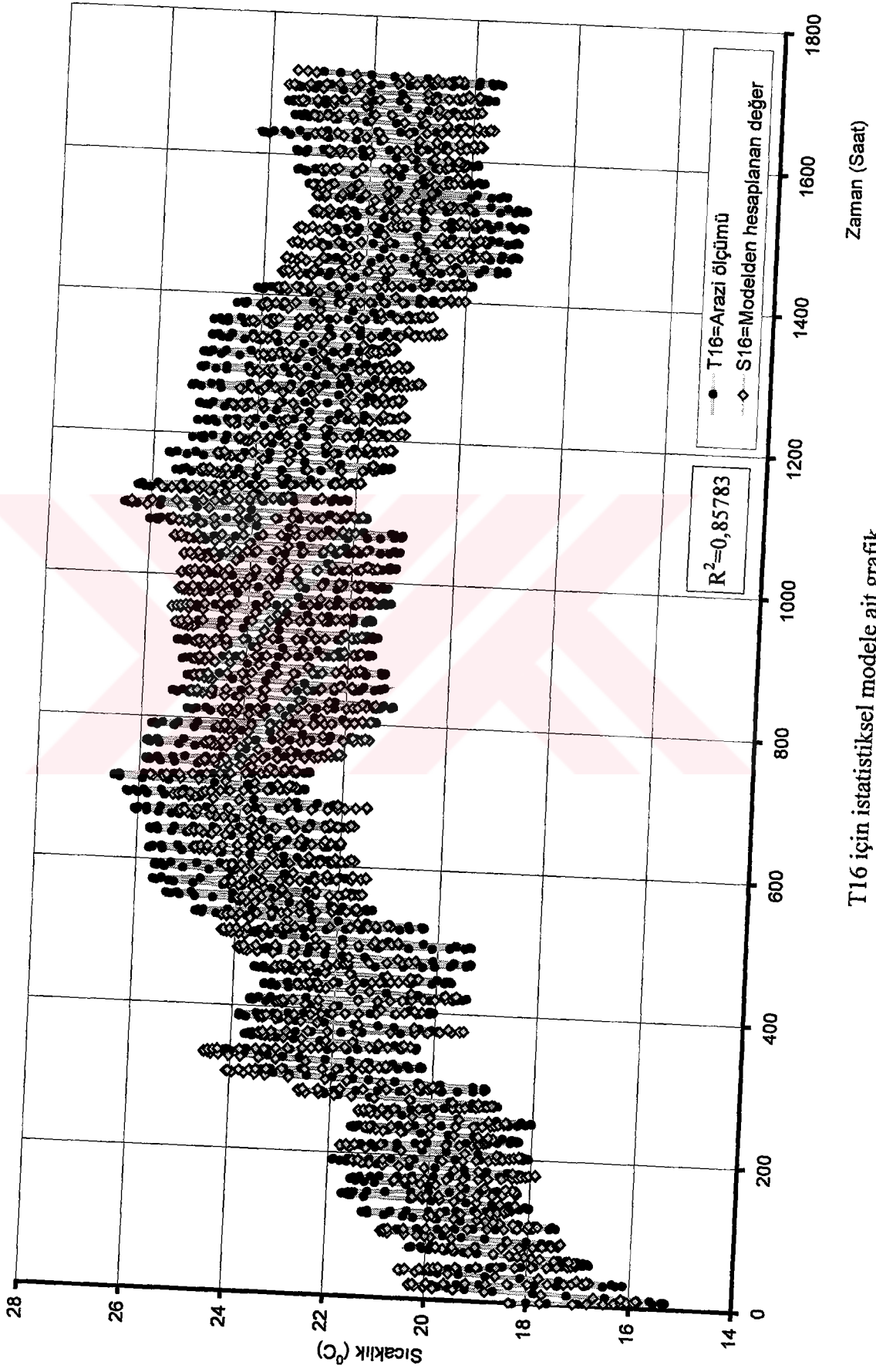


T15 için istatistiksel modele ait grafik

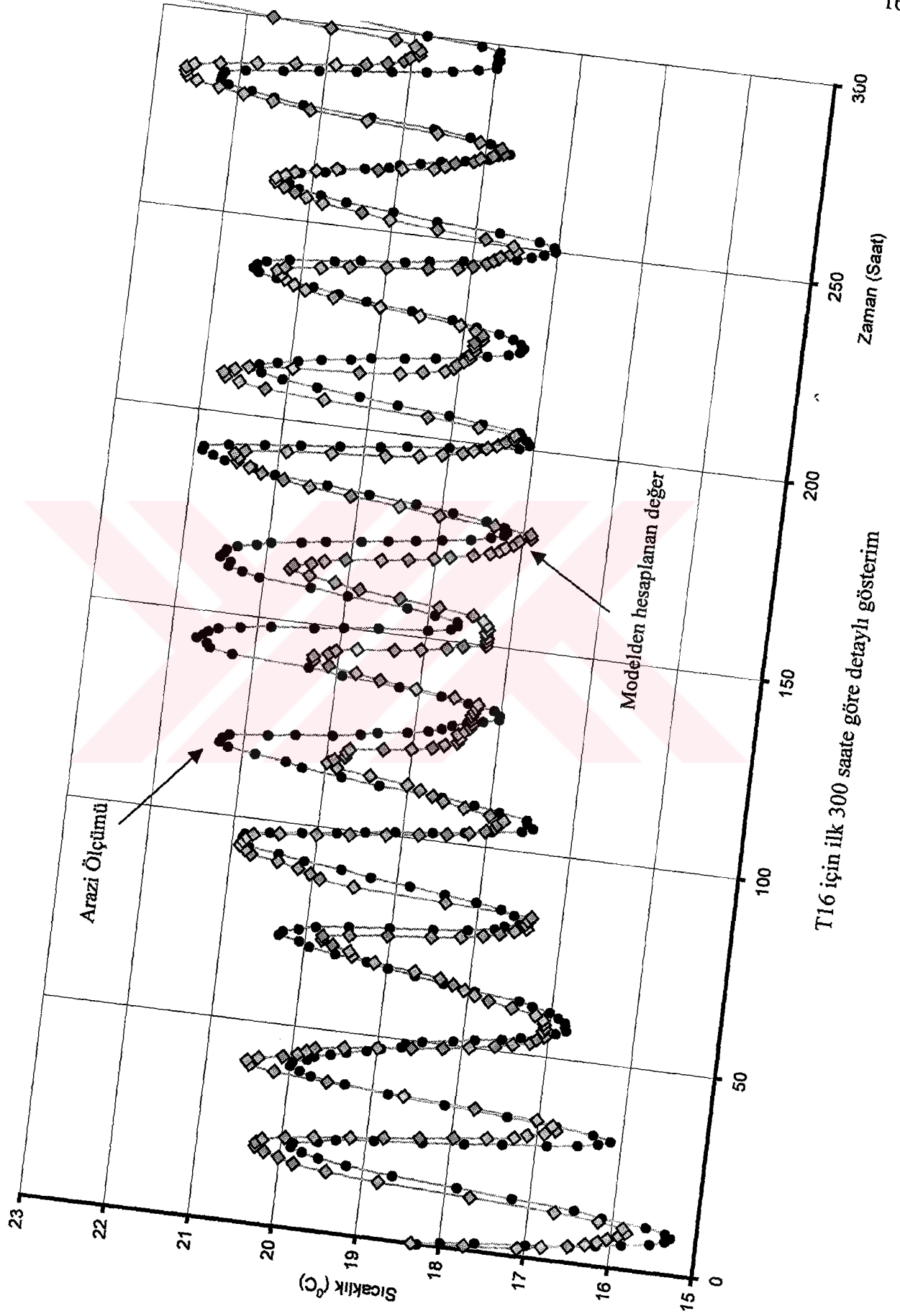


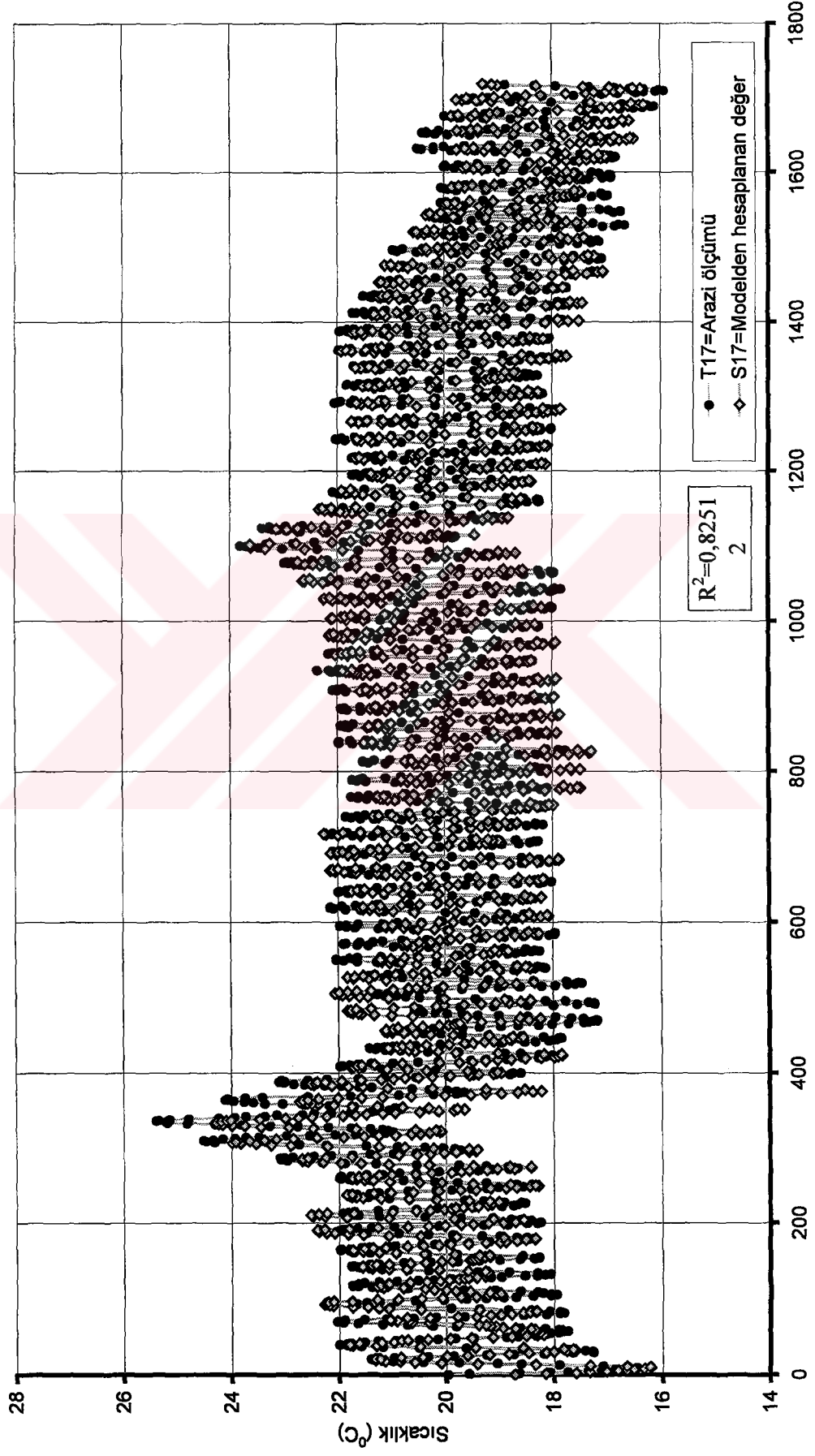
T15 için ilk 300 saate göre detaylı gösterim



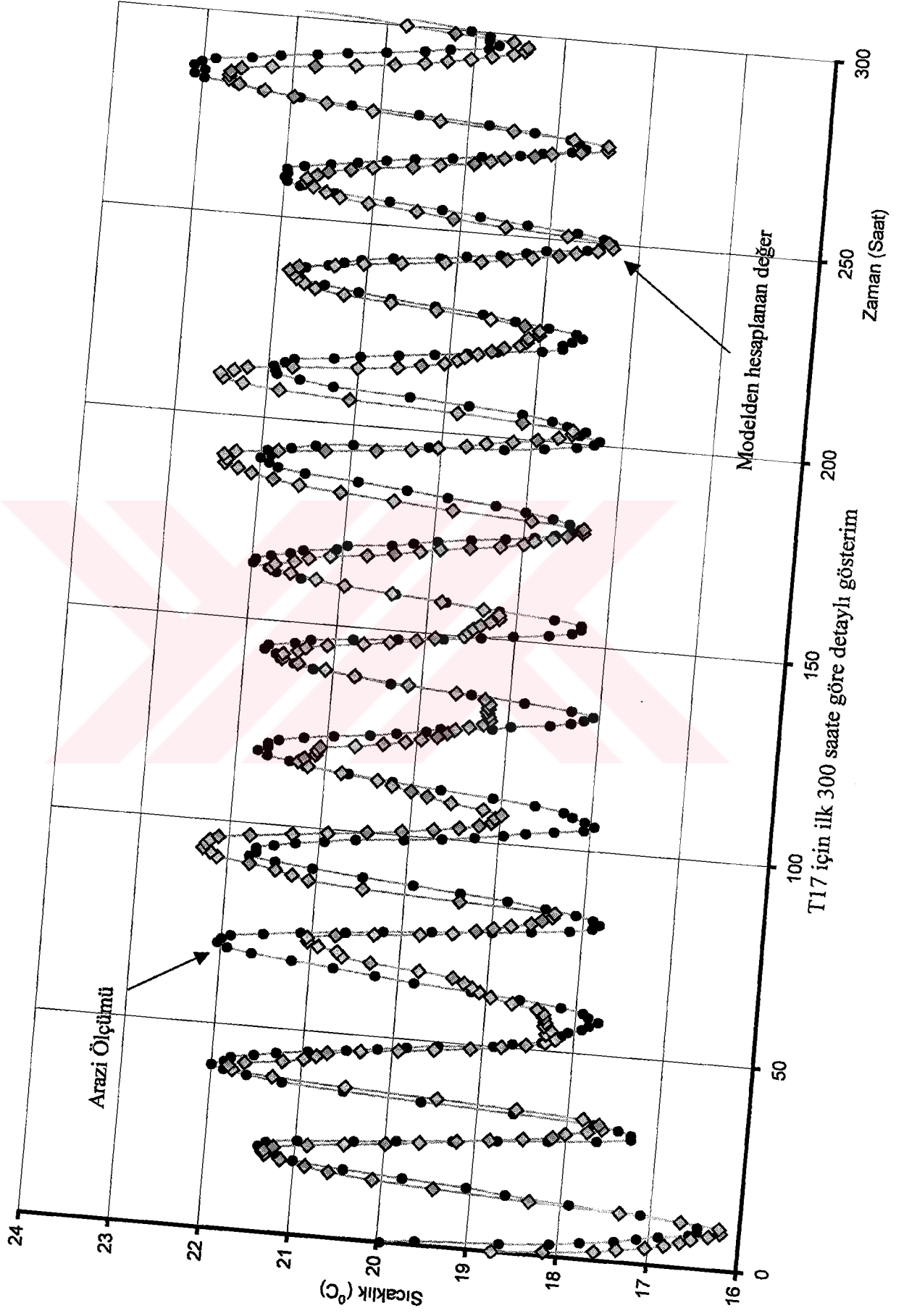


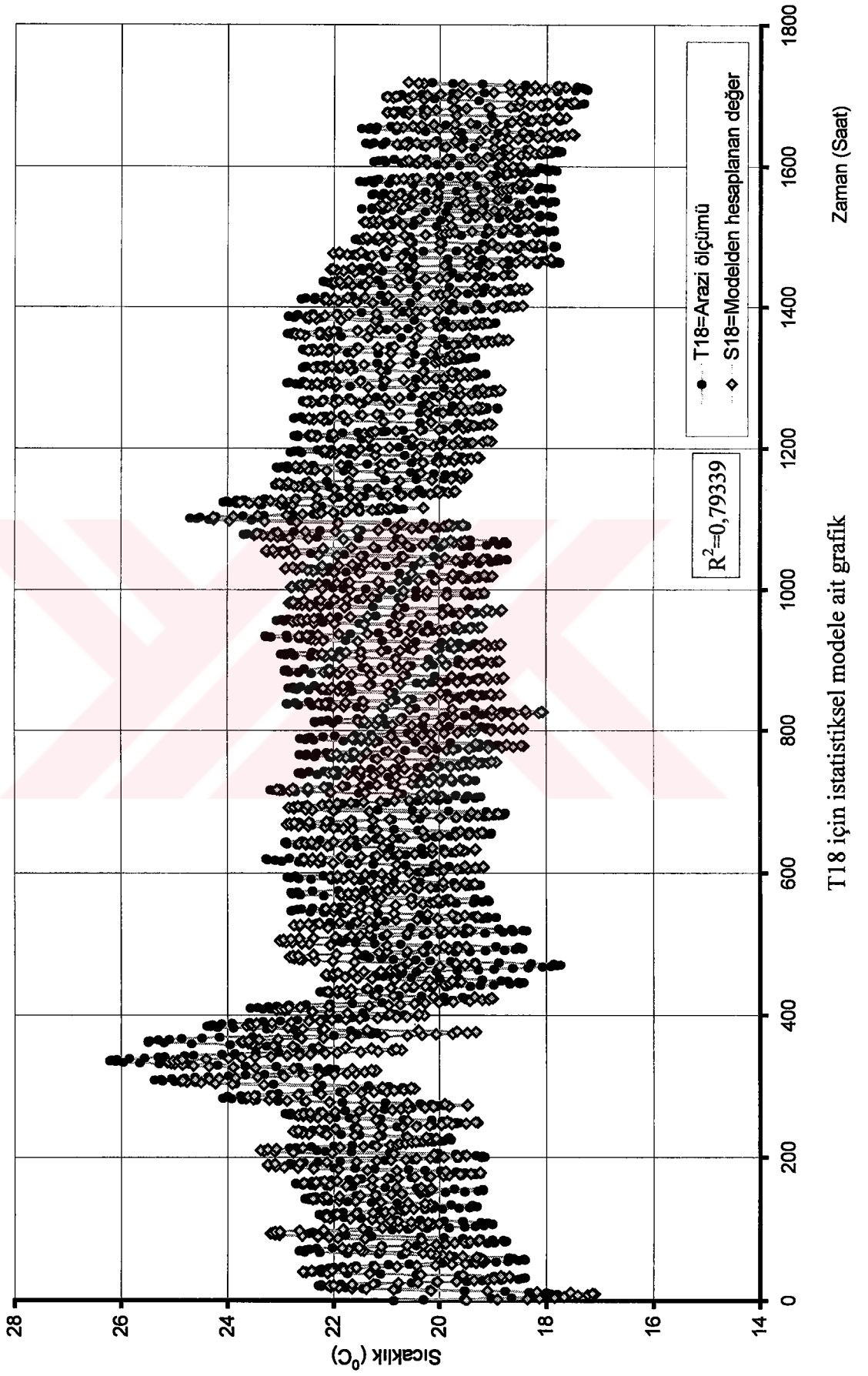
T16 için istatistiksel modele ait grafik



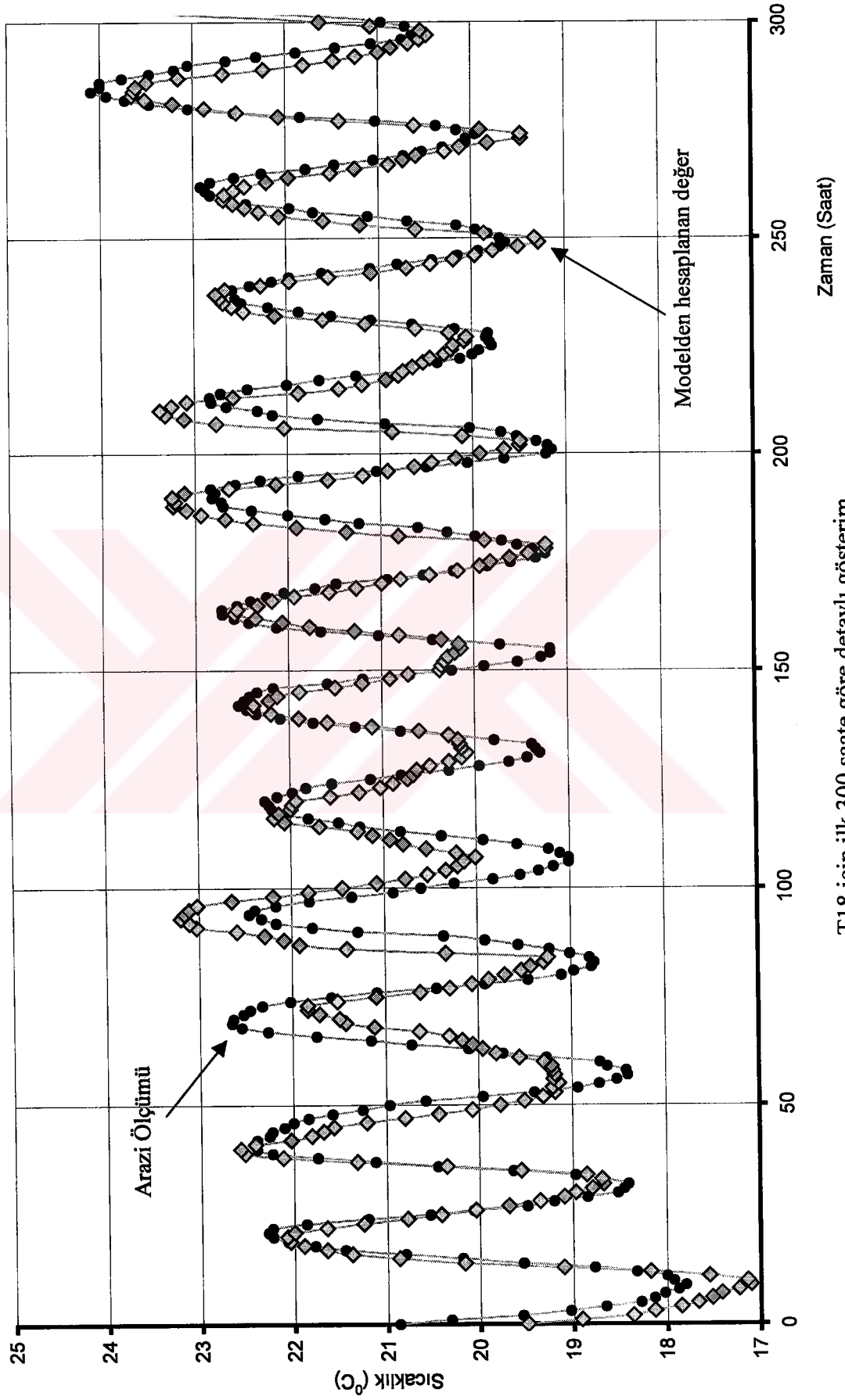


T17 için istatistiksel modele ait grafik

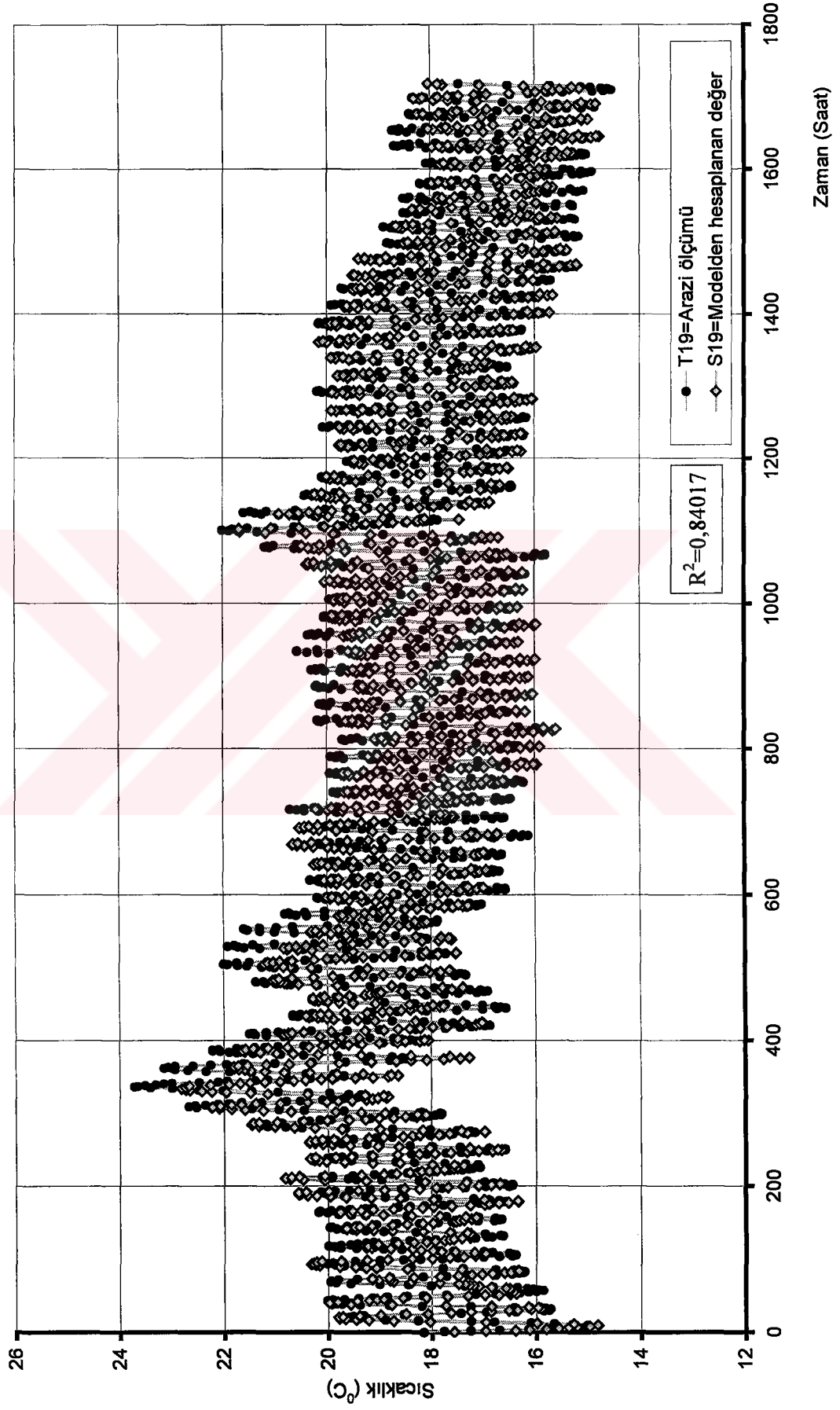






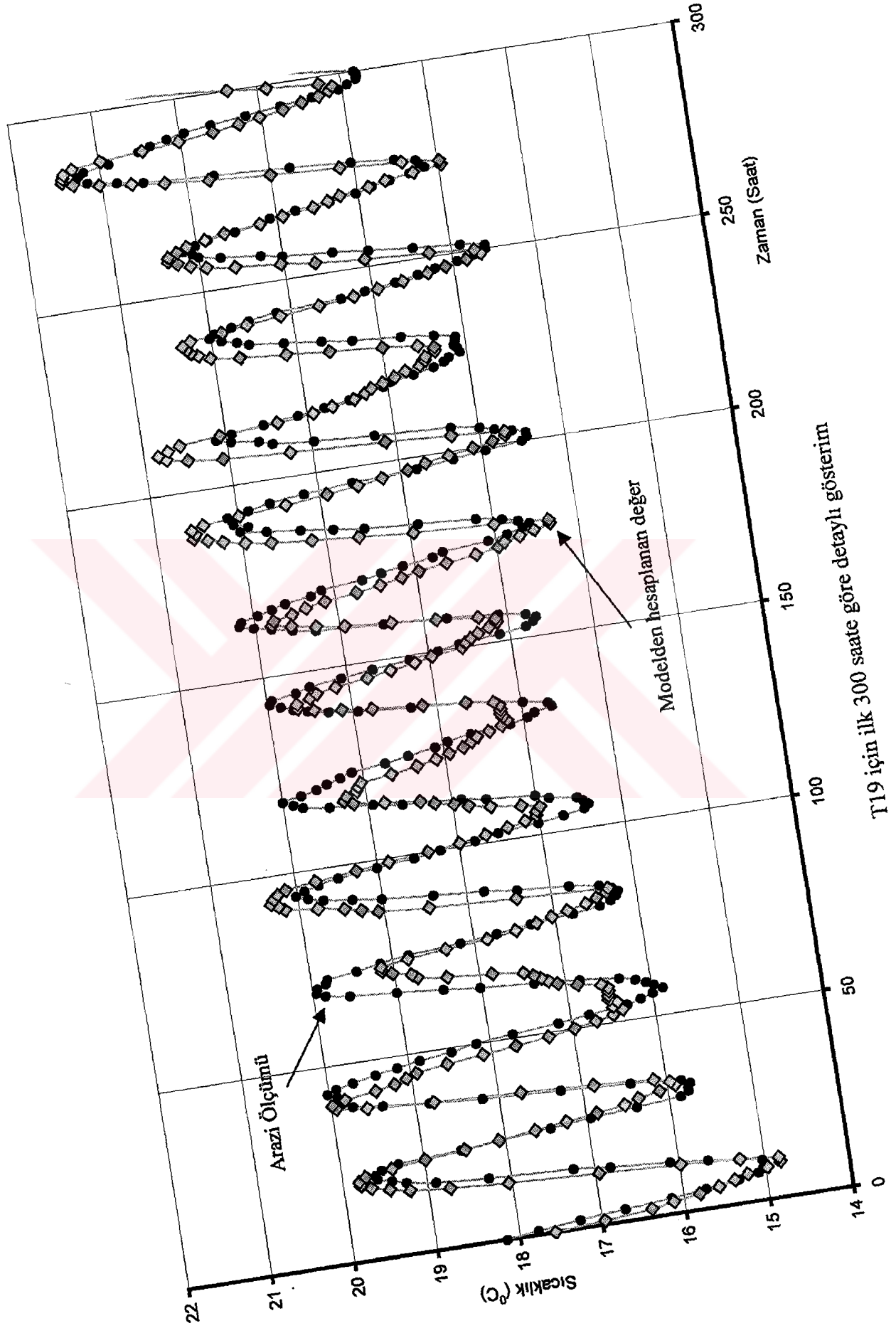


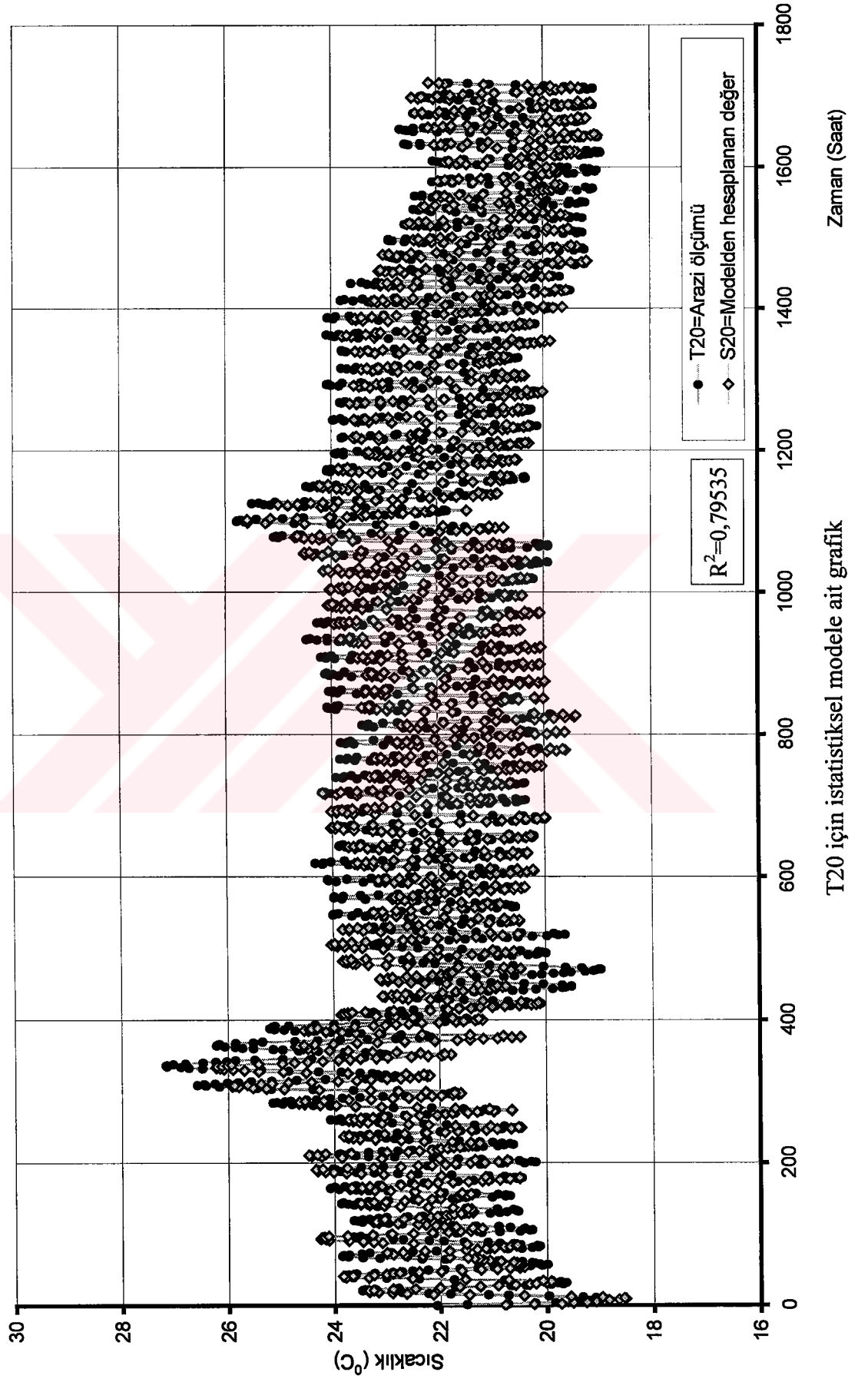
T18 için ilk 300 saate göre detaylı gösterim

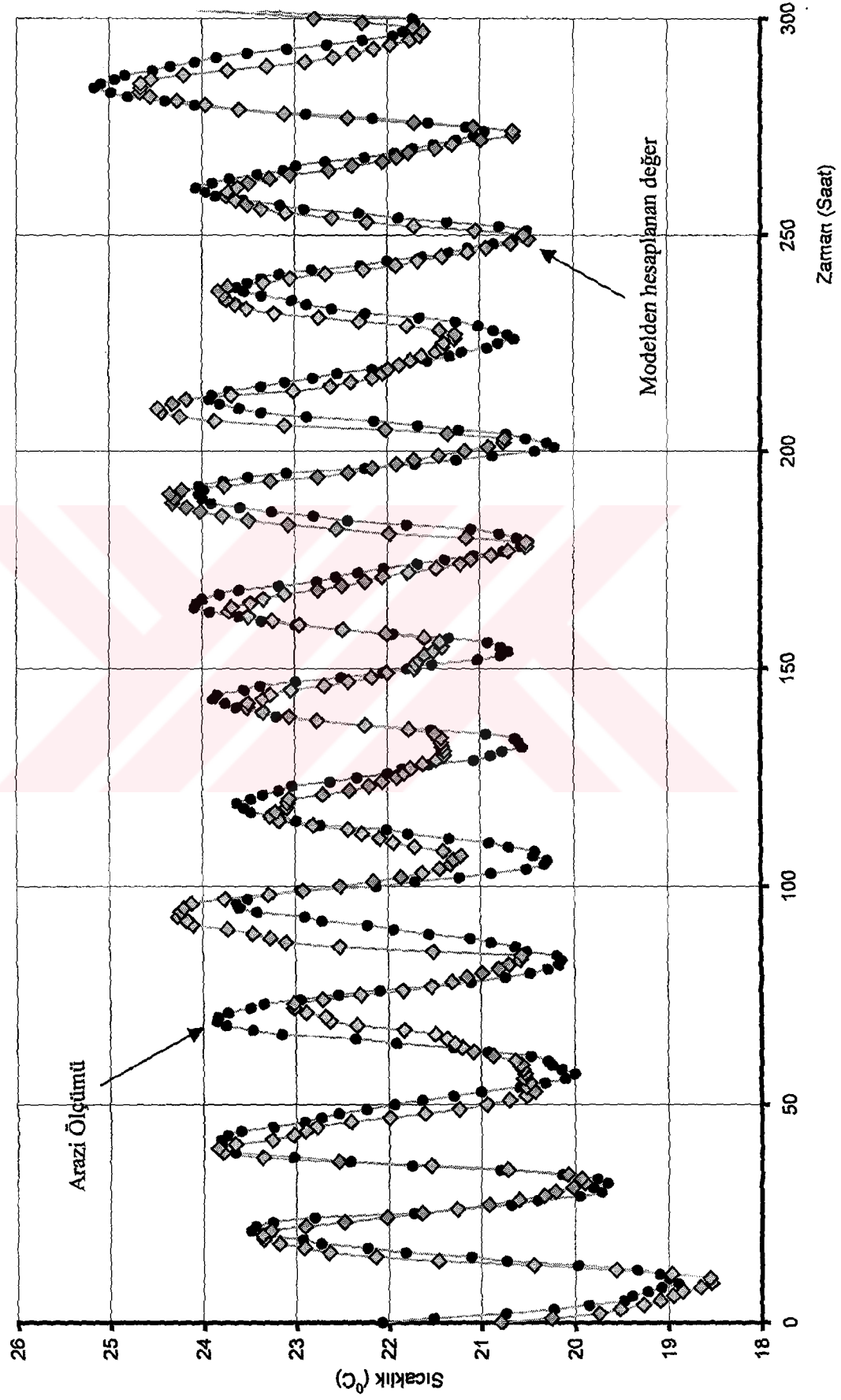


T19 için istatistiksel modele ait grafik









T20 için ilk 300 saate göre detaylı gösterim

EK-D. İSTATİSTİK MODELDEN ELDE EDİLEN EĞRİLERE AİT  
KATSAYILAR



Parametre	T2	T3	T4	T5
A	0,196123936	5,029375003	1,364889349	0,118459723
C	1,08014E+17	7,34282E+16	2,10985E+17	1,30767E+17
Ç	-1,31254E+16	-9,16672E+15	-2,37382E+16	-1,60003E+16
D	8,17518E+14	5,93938E+14	1,38893E+15	1,02938E+15
E	-2,67079E+13	-2,03127E+13	-4,31219E+13	-3,50385E+13
F	437878831854	350852890674	674930989608	599897609591
G	-2837976981	-2419156056	-4184670530	-4063826072
Ğ	2,52116E+14	-3,17457E+14	-1,24192E+15	7,69707E+14
H	-8,50979E+11	2,01469E+12	6,12251E+12	-2,05868E+12
J	2324986387,9	-4079231168	-10657833211	2779398674,4
I	-3161430,289	3717941,1953	8195110,6438	-2134143,436
İ	1911,1202916	-1583,759419	-2785,609474	877,99718995
K	-0,418997096	0,255983052	0,323291510	-0,148216998
L	1,000000000	1,000000000	1,000000000	1,000000000
M	-301,7058739	1,000000000	1,000000000	-808,6915114
O	-1435,958508	-116,2641984	-561,6751566	2014,3455780
Ö	-5367650,652	461040819,84	80706324,145	15338577,273
P	241767,99949	-7198230,905	-467267,6595	-288579,9506
R	-1856,226676	29363,601380	-1841,393780	1410,3133260
Ş	1,000000000	1,000000000	1,000000000	1,000000000
U	0,999256032	1043,7020788	0,994505558	1,002313638
Ü	253325662,66	-60413900,31	-294313010,4	212264022,82
V	-180551,8702	390344,41273	573387,62429	-42658,41474
Y	-470,5575151	-26,79413806	95,773911724	-631,0728294
Z	0,406473617	-0,218665366	-0,331833093	0,469300476

Parametre	T6	T7	T8	T9	T10
A	0,168748507	0,094563876	0,869215948	0,055127265	0,270537916
C	1,72078E+17	1,00545E+17	9,34958E+16	1,09786E+17	1,27756E+17
Ç	-2,05673E+16	-1,24032E+16	-1,20552E+16	-1,34418E+16	-1,53805E+16
D	1,30365E+15	7,95859E+14	7,97141E+14	8,43608E+14	9,85305E+14
E	-4,42221E+13	-2,68843E+13	-2,77414E+13	-2,76736E+13	-3,39552E+13
F	764871291967	458332124520	486810320196	455724653715	597711964760
G	-5318701207	-3118936445	-3399833637	-2986379016	-4222590228
Ğ	7,19251E+14	1,10078E+14	-2,26622E+14	-1,83606E+14	4,48422E+14
H	-1,15859E+12	398135970143	1,61275E+12	1,49961E+12	-7,18902E+11
J	331262392,46	-1603585797	-3351175598	-3321233708	214165973,92
I	590821,21513	1868304,9155	3089943,5550	3231968,8204	380474,21099
İ	-494,8097679	-912,9376131	-1321,543942	-1454,619407	-347,9419708
K	0,111305346	0,162168375	0,214159493	0,247909767	0,086964186
L	1,000000000	1,000000000	1,000000000	1,000000000	1,000000000
M	460,81555031	-1044,091594	4,843508598	497,34966120	-0,049528308
O	1912,2238600	-682,5584146	-139,8207147	-2935,863173	-800,7292157
Ö	14253852,762	4681207,2492	-4015798,478	-3718903,226	21550736,044
P	-185474,3813	-75627,09269	363170,13515	90533,934868	-340947,0902
R	382,67530383	313,92206330	-2773,892421	-526,3153709	1385,7702257
Ş	1,000000000	1,000000000	1,000000000	1,000000000	1,000000000
U	1,001703789	1,921266089	1,004897144	1,156687737	1,002898725
Ü	-353205422,0	298035587,23	-316383642,2	258433360,00	281028083,68
V	581532,78646	-234589,0350	491779,20210	-158596,8277	-196746,1041
Y	51,794190601	-528,9427243	200,12952357	-562,9267274	-506,6392086
Z	-0,280072692	0,472931057	-0,367486034	0,469204646	0,432920053



Parametre	T11	T12	T13	T14	T15
A	0,208071465	0,351467728	0,108772767	0,118312260	0,256833088
C	1,04688E+17	9,22740E+16	1,05436E+17	8,85731E+16	8,93447E+16
Ç	-1,24134E+16	-1,14049E+16	-1,33100E+16	-1,13033E+16	-1,12624E+16
D	7,67085E+14	7,39139E+14	8,82040E+14	7,46034E+14	7,39492E+14
E	-2,52423E+13	-2,56452E+13	-3,10596E+13	-2,59545E+13	-2,57040E+13
F	422003235835	453556035578	554989945982	454794651922	451807984062
G	-2825366866	-3219930821	-3965003060	-3162399260	-3162405126
Ğ	-7,03621E+13	-2,07646E+14	5,32079E+14	5,69424E+14	6,12470E+14
H	1,07371E+12	1,76715E+12	-1,52600E+12	-1,79342E+12	-2,02351E+12
J	-1601238107	-3483267667	1810912733,3	2857124303,6	3410067095,9
I	480454,03026	2905915,9147	-932431,9831	-2488661,505	-3119930,336
İ	340,32639330	-1085,268620	169,44524543	1145,6115115	1482,6871732
K	-0,162674416	0,146328698	0,000650037	-0,217342030	-0,285069228
L	1,000000000	1,000000000	1,000000000	1,000000000	1,000000000
M	-1112,309423	0,620745680	0,447955034	442,16029583	1,376675128
O	-3043,506131	1078,9222311	-0,000647751	1069,3958212	-780,3495136
Ö	-8829782,038	12187095,013	6520481,0621	9469060,6972	4686287,5320
P	253514,00959	-135860,8004	-114787,1999	-174357,6094	-53984,20310
R	-1689,999586	263,29220942	566,27009763	849,32494330	173,12138060
Ş	1,000000000	1,000000000	1,000000000	1,000000000	1,000000000
U	1,017479769	-14,94820752	1,000005420	-28,25289762	0,998310701
Ü	304414386,53	176416572,58	322098672,65	-267709742,8	-300300493,4
V	-254304,6575	-41522,24972	-292163,5343	375451,78580	416850,55230
Y	-489,1833224	-499,8728516	-488,5129583	153,62146469	199,20796052
Z	0,447199163	0,374168848	0,466215388	-0,263602269	-0,316131306
Parametre	T16	T17	T18	T19	T20
A	0,190100841	0,574944386	0,138418594	0,059388588	2,595352762
C	1,07011E+17	1,01222E+17	1,25631E+17	1,29526E+17	1,45703E+17
Ç	-1,36637E+16	-1,20263E+16	-1,44099E+16	-1,37997E+16	-1,67386E+16
D	9,02438E+14	7,56004E+14	8,72342E+14	7,74572E+14	1,00423E+15
E	-3,11780E+13	-2,52963E+13	-2,80432E+13	-2,25579E+13	-3,19750E+13
F	538157523393	428964639124	455119947284	318679939646	514749465542
G	-3659939813	-2897315329	-2929158928	-1667594876	-3290271478
Ğ	4,23738E+14	8,45994E+14	9,99740E+14	7,02160E+14	1,01933E+15
H	-7,19033E+11	-3,35383E+12	-3,70454E+12	-1,16262E+12	-3,91399E+12
J	456883991,51	5143627462,8	5199550398,1	-1246717683	5650391750,5
I	209159,49498	-3697267,552	-3260045,023	3746121,1917	-3636516,570
İ	-374,2539323	1246,6391641	859,81231737	-2606,107923	983,70120092
K	0,114875721	-0,158883291	-0,062371365	0,580150195	-0,072836731
L	1,000000000	1,000000000	1,000000000	-6,129485635	1,000000000
M	4,128662308	1,000000000	2781,7544490	-530,8853332	1,000000000
O	1658,8726542	391,21302368	1163,0256847	-537,1273838	-0,028630537
Ö	16295473,712	19179078,300	21456429,614	7565991,7737	117709519,25
P	-320023,4888	-177160,6139	-439422,0887	-113983,2166	-1706795,527
R	1549,3322995	179,31687736	2380,9337820	453,11783276	6973,7503605
Ş	1,000000000	1,000000000	1,000000000	1,000000000	1,000000000
U	0,690500332	0,999618461	1,014859652	0,990896458	340,83879204
Ü	-336679960,0	298772891,56	-315530197,8	321962642,68	-178340608,7
V	462131,87357	-219090,8793	432646,62502	-272031,2553	485955,90279
Y	239,01063439	-457,4947594	214,92029203	-535,9712527	299,44680083
Z	-0,366598693	0,393099085	-0,333526431	0,493744519	-0,551028006

## EK- E. ANSYS PROGRAM YAZILIM LOG DEĞERLERİ

```

/BATCH
/COM,ANSYS RELEASE 5.5
/input,menust,tmp,,,,,,,,,,,,,1
/GRA,POWER
/GST,ON
/REPLOT,RESIZE
RESUME,FILE,DB,,0
/COM,ANSYS RELEASE 5.5
ERASE
APLOT
!*
/NOPR
/PMETH,OFF
KEYW,PR_SET,1
KEYW,PR_STRUC,1
KEYW,PR_THERM,1
KEYW,PR_FLUID,0
KEYW,PR_ELMAG,0
KEYW,MAGNOD,0
KEYW,MAGEDG,0
KEYW,MAGHFE,0
KEYW,MAGELC,0
KEYW,PR_MULTI,1
KEYW,PR_CFD,0
/GO
!*
/COM,
/COM,Pref:
/COM, Structural
/COM, Thermal
!*
/PREP7
!*
!*
UIMP,1,EX,,0,
UIMP,1,DENS,,1.2045,
UIMP,1,ALPX,,,,
UIMP,1,REFT,,15,
UIMP,1,NUXY,,0,
UIMP,1,PRXY,,,,
UIMP,1,GXY,,,,
UIMP,1,MU,,,,
UIMP,1,DAMP,,,,
UIMP,1,KXX,,0.0257,
UIMP,1,C,,0.24,
UIMP,1,ENTH,,,,
UIMP,1,HF,,,,
UIMP,1,EMIS,,,,
UIMP,1,QRATE,,,,
UIMP,1,VISC,,,,
UIMP,1,SONC,,,,
UIMP,1,RSVX,,,,
!*
!*
UIMP,2,EX,,25,
UIMP,2,DENS,,1.6,
UIMP,2,ALPX,,,,
UIMP,2,REFT,,15,
UIMP,2,NUXY,,0.4,
UIMP,2,PRXY,,,,
UIMP,2,GXY,,,,
UIMP,2,MU,,,,
UIMP,2,DAMP,,,,
UIMP,2,KXX,,0.142,
UIMP,2,C,,1.50696,
UIMP,2,ENTH,,,,
UIMP,2,HF,,,,
UIMP,2,EMIS,,,,
UIMP,2,QRATE,,,,
UIMP,2,VISC,,,,
UIMP,2,SONC,,,,
UIMP,2,RSVX,,,,
!*
FLST,5,660,5,ORDE,35
FITEM,5,1
FITEM,5,-153
FITEM,5,155
FITEM,5,-175
FITEM,5,178
FITEM,5,-215
FITEM,5,219
FITEM,5,-227
FITEM,5,229
FITEM,5,231
FITEM,5,-372
FITEM,5,375
FITEM,5,-378
FITEM,5,380
FITEM,5,-479
FITEM,5,484
FITEM,5,-489
FITEM,5,492
FITEM,5,-498
FITEM,5,500
FITEM,5,-517
FITEM,5,519
FITEM,5,-547
FITEM,5,549
FITEM,5,-574
FITEM,5,576
FITEM,5,-585
FITEM,5,590
FITEM,5,-614
FITEM,5,616
FITEM,5,-664
FITEM,5,672
FITEM,5,-684
FITEM,5,686

```



```

FITEM,5,-694
CM,_Y,AREA
ASEL,, ,P51X
CM,_Y1,AREA
CHKMSH,'AREA'
CMSEL,S,_Y
!*
AMESH,_Y1
!*
CMDEL,_Y
CMDEL,_Y1
CMDEL,_Y2
!*
/UL,MESH,OFF
/USER,1
/REPLO
/ZOOM,1,RECT,-0.106830,
-0.794544,-0.944786,-0.024419
/FOC,1,-3.16356700311 ,
-0.787587059230 , 0.812832265148E-20
/REPLO
/FOC,1,-2.34874487177 ,
0.599344228154 , 0.812832265148E-20
/REPLO
/FOC,1,-2.20716230285 ,
1.45750796222 , 0.812832265148E-20
/REPLO
/DIST,1,1.371742,1
/REP,FAST
/FOC,1,-2.73431664126 ,
0.137640332970 , 0.812832265148E-20
/REPLO
/FOC,1,-3.02365699242 ,
-0.908741210940 , 0.812832265148E-20
/REPLO
/FOC,1,-1.51750173982 ,
0.926390057357 , 0.812832265148E-20
/REPLO
/FOC,1,0.579224914455 ,
1.21176684206 , 0.812832265148E-20
/REPLO
/FOC,1,2.46984611311 ,
-0.504805938111E-02, 0.812832265148E-20
/REPLO
/FOC,1,3.05645394833
-1.17033659692 , 0.812832265148E-20
/REPLO
/AUTO,1
/REP
FLST,5,58,5,ORDE,43
FITEM,5,27
FITEM,5,29
FITEM,5,31
FITEM,5,-32
FITEM,5,44
FITEM,5,46
FITEM,5,48
FITEM,5,78
FITEM,5,119
FITEM,5,121
FITEM,5,-122
FITEM,5,125
FITEM,5,127
FITEM,5,130
FITEM,5,-133
FITEM,5,136
FITEM,5,-137
FITEM,5,142
FITEM,5,144
FITEM,5,166
FITEM,5,179
FITEM,5,182
FITEM,5,184
FITEM,5,363
FITEM,5,-366
FITEM,5,370
FITEM,5,383
FITEM,5,425
FITEM,5,-427
FITEM,5,477
FITEM,5,-479
FITEM,5,484
FITEM,5,-489
FITEM,5,492
FITEM,5,-493
FITEM,5,495
FITEM,5,-498
FITEM,5,662
FITEM,5,-664
FITEM,5,672
FITEM,5,681
FITEM,5,-684
FITEM,5,686
ASEL,S,,P51X
NSL,ALL
NSLA,S,1
NPLOT
FINISH
/SOLU
FLST,2,7791,1,ORDE,99
FITEM,2,903
FITEM,2,-929
FITEM,2,957
FITEM,2,-1043
FITEM,2,1081
FITEM,2,-1243
FITEM,2,1611
FITEM,2,-1687
FITEM,2,1715
FITEM,2,-1798
FITEM,2,1826
FITEM,2,-1887
FITEM,2,2671
FITEM,2,-2697
FITEM,2,3751
FITEM,2,-3759

```

FITEM,2,3773  
FITEM,2,-3812  
FITEM,2,3832  
FITEM,2,-3891  
FITEM,2,3937  
FITEM,2,-3963  
FITEM,2,3991  
FITEM,2,-4009  
FITEM,2,4064  
FITEM,2,-4246  
FITEM,2,4277  
FITEM,2,4298  
FITEM,2,-4360  
FITEM,2,4453  
FITEM,2,4461  
FITEM,2,-4490  
FITEM,2,4572  
FITEM,2,-4707  
FITEM,2,4735  
FITEM,2,-4842  
FITEM,2,5356  
FITEM,2,-5384  
FITEM,2,5406  
FITEM,2,-5434  
FITEM,2,5454  
FITEM,2,-5511  
FITEM,2,5531  
FITEM,2,-5578  
FITEM,2,5678  
FITEM,2,5708  
FITEM,2,-5732  
FITEM,2,10443  
FITEM,2,-13564  
FITEM,2,13883  
FITEM,2,-14098  
FITEM,2,14298  
FITEM,2,-14526  
FITEM,2,14554  
FITEM,2,-14659  
FITEM,2,23280  
FITEM,2,-23444  
FITEM,2,23526  
FITEM,2,-23811  
FITEM,2,26205  
FITEM,2,-26231  
FITEM,2,27339  
FITEM,2,-27419  
FITEM,2,28582  
FITEM,2,28586  
FITEM,2,-28589  
FITEM,2,28609  
FITEM,2,28613  
FITEM,2,-28616  
FITEM,2,28636  
FITEM,2,28640  
FITEM,2,-28643  
FITEM,2,28662  
FITEM,2,-28666  
FITEM,2,28689  
FITEM,2,-28693  
FITEM,2,28716  
FITEM,2,-28720  
FITEM,2,28746  
FITEM,2,-29630  
FITEM,2,29662  
FITEM,2,-30131  
FITEM,2,41431  
FITEM,2,-41438  
FITEM,2,41446  
FITEM,2,-41452  
FITEM,2,41469  
FITEM,2,-41473  
FITEM,2,41496  
FITEM,2,-41500  
FITEM,2,41523  
FITEM,2,-41529  
FITEM,2,41828  
FITEM,2,-42216  
FITEM,2,42218  
FITEM,2,42248  
FITEM,2,-42250  
FITEM,2,42733  
FITEM,2,-43087  
/GO  
!\*  
SF,P51X,CONV,5.8e-4,15  
NSEL,ALL  
FLST,5,53664,1,ORDE,2  
FITEM,5,1  
FITEM,5,-53664  
NSEL,S,,P51X  
NSEL,ALL  
FLST,5,53664,1,ORDE,2  
FITEM,5,1  
FITEM,5,-53664  
NSEL,S,,P51X  
ASEL,ALL  
FLST,5,660,5,ORDE,35  
FITEM,5,1  
FITEM,5,-153  
FITEM,5,155  
FITEM,5,-175  
FITEM,5,178  
FITEM,5,-215  
FITEM,5,219  
FITEM,5,-227  
FITEM,5,229  
FITEM,5,231  
FITEM,5,-372  
FITEM,5,375  
FITEM,5,-378  
FITEM,5,380  
FITEM,5,-479  
FITEM,5,484  
FITEM,5,-489  
FITEM,5,492

```

FITEM,5,-498
FITEM,5,500
FITEM,5,-517
FITEM,5,519
FITEM,5,-547
FITEM,5,549
FITEM,5,-574
FITEM,5,576
FITEM,5,-585
FITEM,5,590
FITEM,5,-614
FITEM,5,616
FITEM,5,-664
FITEM,5,672
FITEM,5,-684
FITEM,5,686
FITEM,5,-694
ASEL,S,,P51X
APLOT
EPLOT
/ZOOM,1,RECT,-0.888421,
-0.569141,0.002141,-0.696869
/AUTO, 1
/REP
/ZOOM,1,RECT,-0.001616,
-0.715653,0.885189,-0.610465
/FOC, 1, 2.29642574458
, -3.35951588496 , 0.812832265148E-20
/REPLO
/FOC, 1, 4.03366537289 ,
-3.33205951152 , 0.812832265148E-20
/REPLO
/AUTO, 1
/REP
/ZOOM,1,RECT,-0.625386,
-0.591682,-0.283440,-0.685599
/AUTO, 1
/REP
FLST,5,26,5,ORDE,13
FITEM,5,134
FITEM,5,138
FITEM,5,152
FITEM,5,155
FITEM,5,158
FITEM,5,167
FITEM,5,-168
FITEM,5,181
FITEM,5,219
FITEM,5,-227
FITEM,5,661
FITEM,5,673
FITEM,5,-680
ASEL,S,,P51X
NSEL,ALL
NSLA,S,1
NPLOT
FLST,2,2199,1,ORDE,48
FITEM,2,4247
FITEM,2,-4275
FITEM,2,4277
FITEM,2,4281
FITEM,2,-4284
FITEM,2,4361
FITEM,2,-4390
FITEM,2,4392
FITEM,2,4398
FITEM,2,-4401
FITEM,2,4275
FITEM,2,4277
FITEM,2,4281
FITEM,2,-4284
FITEM,2,4361
FITEM,2,-4390
FITEM,2,4392
FITEM,2,4398
FITEM,2,-4401

```

```

FITEM,2,5107
FITEM,2,-5169
FITEM,2,5197
FITEM,2,-5305
FITEM,2,5579
FITEM,2,-5637
FITEM,2,5644
FITEM,2,5648
FITEM,2,-5677
FITEM,2,10159
FITEM,2,-10253
FITEM,2,13557
FITEM,2,-13647
FITEM,2,14126
FITEM,2,-14297
FITEM,2,15416
FITEM,2,-15418
FITEM,2,15432
FITEM,2,15436
FITEM,2,-15439
FITEM,2,15459
FITEM,2,15465
FITEM,2,-15468
FITEM,2,15488
FITEM,2,-16283
FITEM,2,41438
FITEM,2,41549
FITEM,2,-41553
FITEM,2,41576
FITEM,2,-41582
FITEM,2,41612
FITEM,2,-41616
FITEM,2,41639
FITEM,2,-41643
FITEM,2,41666
FITEM,2,-41827
FITEM,2,42217
FITEM,2,-42732
/GO
!*
SF,P51X,CONV,1,10
ASEL,ALL
FLST,5,660,5,ORDE,35
FITEM,5,1
FITEM,5,-153
FITEM,5,155
FITEM,5,-175
FITEM,5,178
FITEM,5,-215
FITEM,5,219
FITEM,5,-227
FITEM,5,229
FITEM,5,231
FITEM,5,-372
FITEM,5,375
FITEM,5,-378
FITEM,5,380
FITEM,5,-479
FITEM,5,484
FITEM,5,-489
FITEM,5,492
FITEM,5,-498
FITEM,5,500
FITEM,5,-517
FITEM,5,519
FITEM,5,-547
FITEM,5,549
FITEM,5,-574
FITEM,5,576
FITEM,5,-585
FITEM,5,590
FITEM,5,-614
FITEM,5,616
FITEM,5,-664
FITEM,5,672
FITEM,5,-684
FITEM,5,686
FITEM,5,-694
ASEL,S,,P51X
NSEL,ALL
FLST,5,53664,1,ORDE,2
FITEM,5,1
FITEM,5,-53664
NSEL,S,,P51X
NPLLOT
/STAT,SOLU
SOLVE
FINISH
/POST1
PLNSOL,TEMP,,0,
PLNSOL,TF,X,0,
PLNSOL,TF,Y,0,
PLNSOL,TG,X,0,
PLNSOL,TG,Y,0,
FINISH
!/EXIT,ALL

```