

**DOLGULU YATAKTA ISI DEPOLAMASI
ÜZERİNE BİR ÇALIŞMA**

343

Halime Ö. PAKSOY

**Ç. Ü.
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
KİMYA ANA BİLİM DALI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**A D A N A
Eylül — 1986**

Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitü Müdürlüğüne,

Bu çalışma jürimiz tarafından Kimya Anabilim Dalında
YÜKSEK LİSANS tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan

Yrd. Doç. Dr. Yaşar Demirel

Üye

Prof. Dr. Tuncay Yılmaz

Üye

Doç. Dr. Ali Başçetinçelik

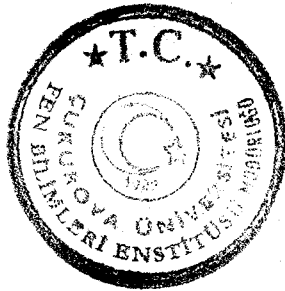
Kod No :

Yukarıdaki imzaların, adı geçen öğretim üyelerine
ait olduğunu onaylarım.

Ural Dinç

Prof. Dr. Ural Dinç

Enstitü Müdürü



DOLGULU YATAKTA ISI DEPOLAMASI

ÜZERİNE BİR ÇALIŞMA

Halime Ö. FAKSOY

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

KİMYA ANA BİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

A D A N A

Eylül - 1986

İÇİNDEKİLER	Sayfa
ÇİZELGE LİSTESİ	II
ŞEKİL LİSTESİ	III
ÖZ	VI
ABSTRACT	VII
1. GİRİŞ	1
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR	7
3. MATERYAL VE YÖNTEM.	10
3.1. Deneysel Metod	10
3.1.1. Deney Düzenegi.	10
3.1.2. Dolgu Malzemesi	10
3.1.3. Düzenegin Kontrolu.	11
3.2. Hesaplama Yöntemleri.	12
3.2.1. Numerik Çözüm 1	13
3.2.2. Numerik Çözüm 2	14
3.2.3. Analitik Çözüm	15
3.2.4. Tabakalaşma Katsayısının Hesaplanması	16
3.2.5. Depolama Veriminin Hesaplanması	17
3.2.6. Büyük Skalalı Bir Isı Deposunun Tasarımı	18
3.2.7. Basınç Düşmesinin Hesaplanması.	20
4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA.	21
5. SONUÇLAR	57
ÖZET	58
SUMMARY.	60
SEMBOLLER LİSTESİ.	62
KAYNAKLAR.	64

	Sayfa
TEŞEKKÜR.	67
ÖZGEÇMİŞ.	68
EK 1 :Deney sonuçları	
EK 2 :Numerik model I için bilgisayar program sonuçları	

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 1. Isı transfer katsayısı eşitlikleri	7
Çizelge 2. Dolgu maddesi kumun özellikleri	11
Çizelge 3. Depolama işlemi için kullanılan hava akım hızları ve giriş sıcaklıkları.	21
Çizelge 4. Geri kazanma işlemi için kullanılan hava akım hızları ve giriş sıcaklıkları.	22

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1. Dolulu yatak ısı deposu şematik görünüşü . .	10
Şekil 2. Yatak boyunca basınç düşmesiyle hava akım hızı arasındaki ilişki.	23
Şekil 3. Deneysel birimsiz hava sıcaklığının x ve t ile değişimi.	25
Şekil 4. Deneysel birimsiz depo sıcaklığının x ve t ile değişimi.	26
Şekil 5. Birimsiz hava sıcaklığı ile birimsiz depo sıcaklığının karşılaştırılması.	27
Şekil 6. Deneysel birimsiz hava sıcaklığının x ve t ile değişimi.	28
Şekil 7. Deneysel birimsiz depo sıcaklığının x ve t ile değişimi.	29
Şekil 8. Geri kazanma işlemi için deneysel birimsiz hava sıcaklığının x ve t ile değişimi	30
Şekil 9. Geri kazanma işlemi için deneysel birimsiz depo sıcaklığının x ve t ile değişimi.	31
Şekil 10. Geri kazanma işlemi için deneysel birimsiz hava sıcaklığının x ve t ile değişimi . . .	32
Şekil 11. Geri kazanma işlemi için deneysel birimsiz depo sıcaklığının x ve t ile değişimi . . .	33
Şekil 12. Depolama veriminin hava akım hızıyla değişimi.	35
Şekil 13. Hava akım hızının deney sonuçları üzerindeki etkisi.	36

	<u>Sayfa</u>
Şekil 14. Hava akım hızının deney sonuçları üzerindeki etkisi	37
Şekil 15. Hava giriş sıcaklığının deney sonuçları üzerindeki etkisi.	38
Şekil 16. Hava giriş sıcaklığının deney sonuçları üzerindeki etkisi.	39
Şekil 17. Deney sonuçlarının Model I, Model II ve Model III ile karşılaştırılması.	40
Şekil 18. Deney sonuçlarının Model I, Model II ve Model III ile karşılaştırılması.	41
Şekil 19. Deney sonuçlarının Model I, Model II ve Model III ile karşılaştırılması.	42
Şekil 20. Model III için birimsiz sıcaklığın x ve t ile değişimi.	44
Şekil 21. Numerik model I için birimsiz sıcaklığın x ve t ile değişimi.	45
Şekil 22. Numerik model I için birimsiz sıcaklığın x ve t ile değişimi.	46
Şekil 23. Numerik model I için birimsiz sıcaklığın x ve t ile değişimi.	47
Şekil 24. Numerik model I için birimsiz sıcaklığın x ve t ile değişimi.	48
Şekil 25. Numerik model I için birimsiz sıcaklığın x ve t ile değişimi.	49
Şekil 26. Hava giriş sıcaklığının nümerik model I sonuçları üzerindeki etkisi.	51

Şekil 27. Hava akım hızının numerik model I sonuçları üzerindeki etkisi.	52
Şekil 28. Tabakalaşma katsayısı.	54

Öz

Bu çalışmada , güneş enerjisi sistemlerinde çok kullanılan dolgulu yatakta duyarlı ısı tekniği ile ısı depolaması incelenmiştir. Dolgu maddesi olarak küçük silindirik tüpler içinde kum kullanılmıştır. Ölçümler sonucunda, değişik hava akım hızlarında ve giriş sıcaklıklarında depo boyunca sıcaklık dağılımları elde edilmiştir. Deneysel sonuçlar, iki numerik model, bir de analitik model çözümlerinden elde edilen teorik sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Ayrıca kum için tabakalaşma katsayısı hesaplanmış depo performansı üzerindeki etkileri tartışılmıştır. Depo performansını belirlemek için depolama verimi de hesaplanmıştır. Daha büyük skalalı bir ısı deposu tasarımı için bir örnek verilmiştir.

ABSTRACT

A packed bed heat storage system, storing sensible heat is investigated. Sand in small cylindrical tubes is used as packing material. From the experimental results, temperature profiles at different air flow rates and inlet temperatures are obtained. The experimental results are compared with theoretical results calculated from one analytical and two numerical models. The stratification coefficient for sand is calculated and its effects on the performance of the heat storage unit are discussed. The storage efficiencies are calculated in order to determine the performance of the heat storage unit. An example is given for the design of a heat storage system in a larger scale.

1. GİRİŞ

Günümüzün en önemli sorunlarından biri ucuz, temiz ve kolay elde edilen bir enerji kaynağı sağlamaktır. Gittikçe azalan fosil yakıt kaynakları, nükleer enerji ve fosil yakıt kaynaklarının tehlikeli boyutlara ulaşan çevre kirliliği problemleri güneş enerjisini karşımıza bir alternatif kaynak olarak çıkarmıştır.

Güneş enerjisi sürekli olmadığından, geceleri ve bulutlu havalarda enerji gereksinimi fosil yakitlarla, enerjiyle veya daha önceden depolanan ısıнын geri kazanılmasıyla karşılanılır. Bu yüzden ısı deposu güneş enerjisi sisteminin önemli bir parçasıdır. Isı depolaması, duyarlı ısı, ergime ısısı, tepkime ısısı veya bunların birleşimi şeklinde yapılır. Duyarlı ısı depolaması en yaygın kullanılan metoddur. Bunun nedeni bilinen ve ucuz teknoloji gerektirmesidir. Bu tip depolamada genellikle taş ve su ısı depolama maddesi olarak kullanılır. Su, kolay elde edilebilen ucuz ve yüksek gizli ısıya sahip bir madde olduğundan bu iş için en uygun maddelerdendir. Yalnız 100°C 'nin üstünde depolama tankinin buhar basıncını kaldırarak şekilde tasarlanması gerekir. Isı depolama maddesi olarak kullanılan bazı organik yağlar, erimiş tuzlar ve sıvı metaller buhar basıncı problemine çözüm getirmekle beraber kullanımda, depolamada, fiyat ve kullanılabilir sıcaklık aralıklarında başka problemler yaratmaktadır. Taş, su kadar yüksek gizli ısıya sahip olmamakla beraber buhar basıncı problemini ortadan kaldırmaktadır. Fakat taşın ısı kapasitesi daha düşük olduğundan aynı miktarda ısıyı depolamak için sudan daha fazla hacimde taşa gerek vardır. Bir karşılaştırma yapılırsa, suyun yoğunluğu 1000 kg/m^3 , ısı kapasitesi $4186 \text{ kJ/m}^3\text{ }^{\circ}\text{C}$, % 30 boşlukla doldurulmuş taşın yoğunluğu $2240 \text{ kg/m}^3 * 0.70 = 1850 \text{ kg/m}^3$, ısı kapasitesi $879.1 \text{ J/kg }^{\circ}\text{C}$, hacimsel ısı kapasitesi $1626.3 \text{ kJ/m}^3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'dir. (Perry, Chilton, 1972)

$$\frac{(\text{hacimsel Isı Kapasitesi})_{\text{su}}}{(\text{Hacimsel Isı Kapasitesi})_{\text{taş}}} = \frac{4186 \text{ kJ/m}^3 \text{ } ^\circ\text{C}}{1626.3 \text{ kJ/m}^3 \text{ } ^\circ\text{C}} = 2.6$$

Böylece belli bir hacimdeki suyla, aynı hacimde taşın depolayacağı ısıdan 2.6 kat fazla ısı depolanabilir.

Ergime ısısından yararlanarak ısı depolanan sistemlerde faz değıştiren maddeler kullanılır. Bunlar arasında en çok kullanılanları parafin ve bazı tuz hidratlarıdır. Bu maddelerin en önemli özellikleri ısı depolamaya elverişli bir sıcaklıkta faz değıştirmeleridir. Glauber tuzu ($\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10 \text{ H}_2\text{O}$) bu amaçla kullanılan en uygun tuz hidratıdır; yoğunluğu 1460 kg/m^3 , ergime ısısı 251.2 kJ/kg , ısı kapasitesi $2.093 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C}$, erime noktası ise 32°C 'dir. Parafinin yoğunluğu 820 kg/m^3 , ergime ısısı 174.6 kJ/kg , erime noktası ise 48°C 'dir. $32^\circ\text{C} - 50^\circ\text{C}$ sıcaklıkları arasında çalışan suyun depolama maddesi olarak kullanıldığı bir sistemle Glauber tuzunun kullanıldığı bir sistemi karşılaştırırsak; suyun depolayacağı ısı:

$$4.186 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C} * (50 - 32)^\circ\text{C} * 1000 \text{ kg/m}^3 = 75348 \text{ kJ/m}^3$$

Glauber tuzunun depolayacağı ısı:

$$251.2 \text{ kJ/kg} * 1460 \text{ kg/m}^3 + 2.093 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C} * 1460 \text{ kg/m}^3 * (50 - 32) = 421756 \text{ kJ/m}^3$$

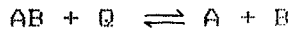
$$(421756 \text{ kJ/m}^3) / (75348 \text{ kJ/m}^3) = 5.6$$

Bu oranlamadan da anlaşılacağı gibi, belirli hacimdeki Glauber tuzu aynı hacimdeki suyun depolayacağı ısıdan 5.6 kat daha fazla ısı depolayabilir.

Faz değıştiren maddelerin ısı depolamasında kullanılmasında bazı problemler ortaya çıkmıştır. Bunlardan biri maddenin donma noktasında katı hale dönmemesidir (aşırı donma). Bunun nedeni, kapalı kaplarda kul-

lanılan tuz hidratlarının ancak bir kristal çekirdeği olduğu zaman kristallenmeleridir. Bunu sağlamak için aynı kristal formuna sahip fakat daha düşük çözünürlüğü olan bir madde kullanılır. Glauber tuzuna Borax ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10 \text{H}_2\text{O}$) eklendiğinde bu problemin ortadan kalktığı gözlenmiştir. Diğer bir problem, karışımın bileşkenlerine ayrışmasıdır; yani erimemiş tuzun dibe çökmesidir. Bunu önlemek için de kil kullanılır. Aksi halde madde nin tekrar tekrar kullanımında, dibe çöken madde miktarı artacak ve böylece ısı depolama kapasitesi de düşecektir. Kil eklenmemiş Glauber tuzunun ergime ısısı 20 - 40 erime - katılaşma çevriminden sonra 251.2 kJ/kg'dan 62.8 kJ/kg 'a düşmüştür. Kil eklendikten sonra ancak 200 çevrimden sonra 104.6 kJ/kg değerine düşmüştür (Mancini,1983).

Tepkime ısısından yararlanan sistemlerde tersinir bir tepkime kullanılır. Bu sistemler üç grupta incelenebilir. a) Termokimyasal enerji depolaması, b) kimyasal ısı pompası depolaması ve c) termokimyasal ısı boruları (Wyman ve ark.,1980). Burada karşılaşılan ortak problem, tepkimelerin tam tersinir olmamalarından kaynaklanmaktadır. Termokimyasal enerji depolamasında, bir AB maddesinin yüksek sıcaklıkta ortamdan enerji alarak A ve B bileşkenlerine

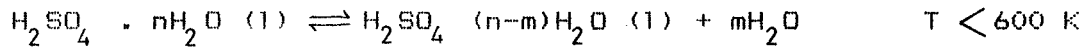


tersinir tepkimesiyle ayrışması söz konusudur. Bu tepkimelerden bazıları:

	H, (kJ)	T, (K)
$\text{NH}_4\text{F (s)} \rightleftharpoons \text{NH}_3 \text{ (g)} + \text{HF (g)}$	149.30	499
$\text{Mg (OH)}_2 \text{ (s)} \rightleftharpoons \text{MgO (s)} + \text{H}_2\text{O (g)}$	81.06	531
$\text{NH}_4\text{HSO}_4 \text{ (l)} \rightleftharpoons \text{NH}_3 \text{ (g)} + \text{H}_2\text{O (g)} + \text{SO}_3 \text{ (g)}$	337.00	740
$\text{Ca (OH)}_2 \text{ (s)} \rightleftharpoons \text{CaO (s)} + \text{H}_2\text{O (g)}$	109.26	752

Buradaki T sıcaklığı, denge sabitinin bire eşit olduğu yani tepkimeye giren ve çıkan maddelerin bir atmosferlik basınçta eş molar derişimlerde bulunduğu sıcaklıktır.

Kimyasal ısı pompası sistemine örnek olarak (Wyman ve ark.,1980) seyreltik sülfürik asit çözeltisinin, güneş enerjisinin asit çözeltisindeki bir miktar suyu buharlaştırmasıyla konsantre duruma gelmesi incelenebilir. Burada elde edilen su buharı daha sonra yoğunlaştırılarak, eğer bu sıcaklıkta kullanılabilir ise, gizli ısısından yararlanılır. Depodan ısı kazanılması gerektiğinde, suyun donmaması sağlandığı takdirde, su ortamdan alınan sıcaklıkla buharlaştırılır. Asit çözeltisinin ve suyun sıcaklıkları iyi ayarlanırsa su buharı çözeltinin içinde yoğunlaşacaktır. Böylece gizli ısı ile beraber karıştırma ısısı da elde edilir. Bu sistem aşağıdaki tepkimeyle gösterilebilir:



Termokimyasal ısı borularında (heatpipe) kullanılan tepkimelerde kolaylıkla kondanse olmayan, gaz fazındaki reaktifler bulunur. Tepkime ürünleri uzun mesafelere termokimyasal ısı borularıyla termal enerjiyi iletmek için kullanılırlar. Burada kullanılabilir tepkimelerin bazıları:

	H, (kJ)	T, (K)
$\text{CH}_3\text{OH} (g) \rightleftharpoons 2 \text{H}_2 (g) + \text{CO} (g)$	90.18	420
$\text{CH}_4 (g) + \text{H}_2\text{O} (g) \rightleftharpoons \text{CO} (g) + 3 \text{H}_2 (g)$	206.20	960
$\text{SO}_3 (g) \rightleftharpoons \text{SO}_2 (g) + 1/2 \text{O}_2 (g)$	98.64	1040

Bu tepkimelerin hepsinde katalizör kullanılır.

Bu araştırmada, duyarlı ısıdan yararlanarak ısı depolayan bir ısı deposu üzerinde laboratuvarında deneysel çalışmalar yapılmıştır. Dolgu mad-

desi olarak küçük plastik tüpler içerisinde kum kullanılmıştır. Amaç, dolgulu yatak boyunca hava ve dolgu sıcaklık dağılımlarını belirlemek ve bu değerleri teorik modellerden elde edilen sonuçlarla karşılaştırmaktır. Elde edilen sıcaklık dağılımları daha büyük skalalı ısı deposunun tasarımında kullanılmaktadır. Deponun performansını belirlemek için depolama verimi hesaplanmıştır. Ayrıca depo boyunca ısı tabakalaşmasının depo performansı üzerindeki etkileri incelenmiş ve kum için "tabakalaşma katsayısı" bulunmuştur.

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Dolgulu yatakta ısı depolamasıyla ilgili şimdiye kadar birçok çalışma yapılmıştır. Bu çalışmaların bir bölümü dolgulu yatakta ısı transfer olayını açıklayacak bir teorik modelin geliştirilmesi ile ilgilidir. Bu probleme analitik bir çözüm öneren ilk araştırmacı Schumann (1929) 'dır. Bu çözüm güneş enerjisi sistemlerine değişik şekillerde birçok araştırmacı tarafından uygulanmıştır. Hughes ve ark., 1976 yılında yayınlanan araştırmalarında , dolgulu yatakta ısı depolaması için Schumann modelinden uyarlanan daha basit bir model önermişlerdir. Isı deposu için tek ve iki fazlı modellere ise Riaz (1977) tarafından bir analitik çözüm çıkarılmıştır. Vortmeyer ve Schaeffer ise 1974 yılında Tek Boyut Teorisi (One Dimensional Theory) ile tek ve iki fazlı modellerin birbirine eşdeğer olduklarını göstermişlerdir. Taş dolgulu yatak için Farber ve Coutier 1982 de yayınlanan araştırmalarında numerik bir modeli, Saez ve McCoy ise 1983 te diğer bir analitik çözümü önermişlerdir.

Dolgulu yatak için uygun bir model seçiminden sonra depo tasarımı için gerekli ısı transfer parametrelerinin ve ısı transfer katsayısının belirlenmesi gerekir. Löff ve Hawley (1940) hacimsel ısı transfer katsayısının birim kesit alandaki kütle akım hız ve karakteristik çapa bağlı olduğunu göstermiş ve ısı transfer katsayısı için bir eşitlik elde etmişlerdir. Alanis ve ark.(1977) taş dolgu için ısı transfer katsayısını belirleyecek bir eşitliği deneysel sonuçlardan bulmuşlardır. 1979 'da Wakao ve ark. ısı transfer katsayısı için Nusselt Sayısı Korelasyonunu çıkarmışlardır. Isı transfer katsayısı için diğer bir eşitlik de

Farber ve Coutier (1982)'e aittir. Bu eşitlikler (Çizelge 1) de gösterilmiştir.

Çizelge 1 : Isı transfer katsayısı eşitlikleri, h_v ($W/m^2 \cdot ^\circ C$), G ($kg/m^2 \cdot s$), D_p (m)

Löf ve Hawley	$h_v = 652 (G/D_p)^{0.7}$
Alanis, Saravia ve Rovetta	$h_v = 824 (G/D_p)^{0.92}$
Wakao, Kaguei ve Funazkri	$Nu = 2 + 1.1 Fr^{1/3} Re^{0.6}$
Coutier ve Farber	$h_v = 700 (G/D_p)^{0.76}$

Isı deposu tasarımında etkin parametreler ısı transfer katsayısı, havanın birim kesit alandaki akım hızı, dolgu karakteristik çapı, yatak uzunluğu ve yatak yüzey alanıdır. Bunların teorik olarak önceden belirlenmesi ile ilgili bir araştırma Dixon ve Cresswell (1979) tarafından yapılmıştır. Farber ve Coutier (1982) geliştirdikleri nümerik model sonuçlarına dayanarak ısı transferinde etkin parametrelerin belirlenmesi konusunda önerilerde bulunmuşlardır. Taş dolgulu ısı deposu sisteminin ısı transfer özellikleri ve basınç düşmesi ile ilgili diğer bir araştırma da Chandra ve Willits (1981) tarafından yapılmıştır.

Isı deposunun performansını belirlemek için depolama veriminin hesaplanması gerekir. Hollands, Chinneck ve Chandrashekar 'in güneş enerjisi sistemlerinde toplaç ve depolama verimiyle ilgili araştırmaları 1979 da yayınlanmıştır. Yatak boyunca ısı tabakalaşmasının depo performansı

Üzerindeki etkileri Phillips (1981) tarafından incelenmiş ve "tabakalaşma katsayısı" eşitliği çıkarılmıştır.

Güneş enerjisinde ısı depolamasında gerekli teknolojiyle ilgili Wyman ve ark. (1980) 'nin geniş çaplı araştırmalarında dolgulu yataktaki ısı depolaması için gerekli teknoloji ile ilgili bilgiler verilmiştir.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Deneysel Metot

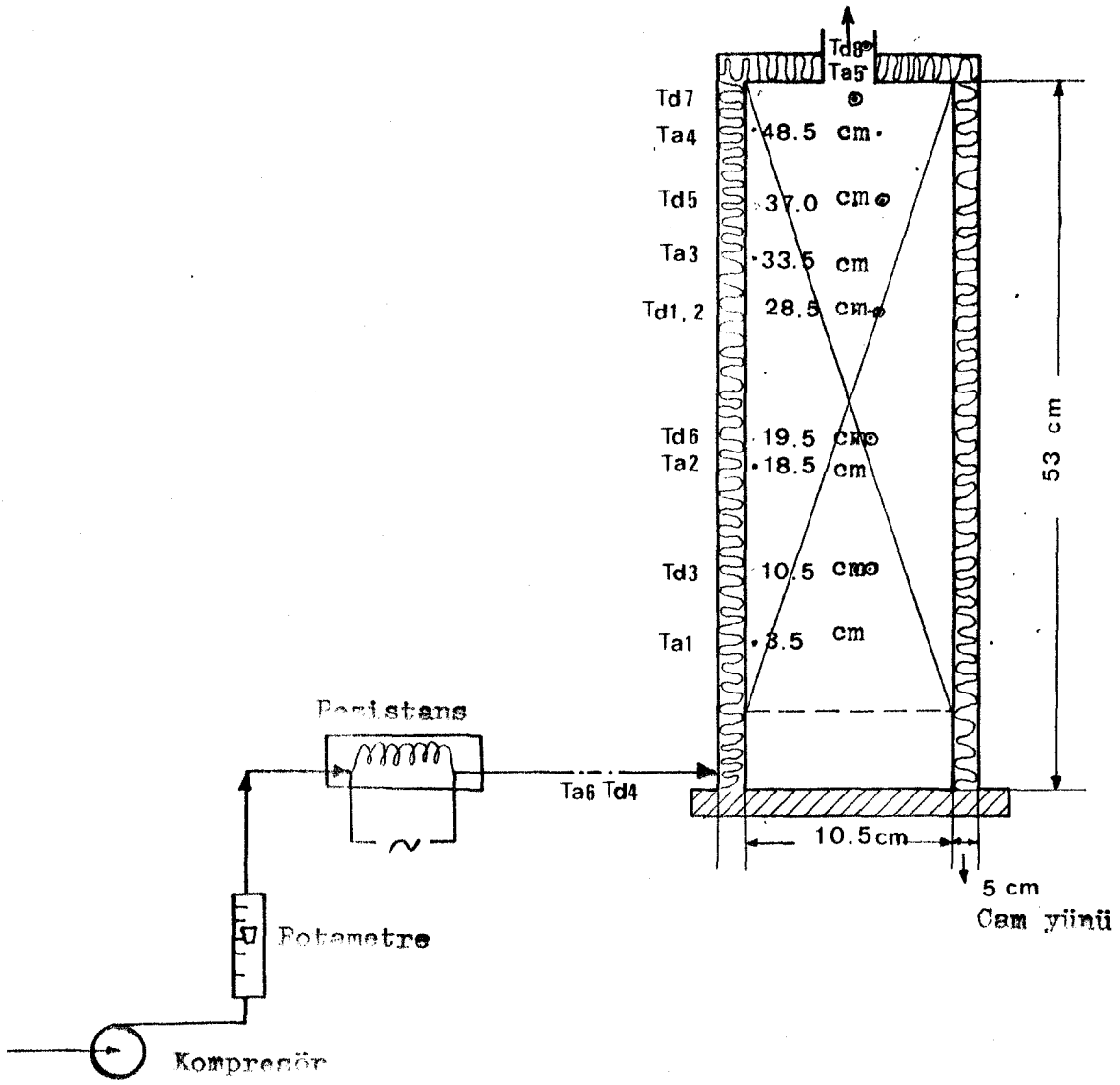
Güneş enerjisi sistemlerinde dolgu yatakta ısı depolaması ile ilgili deneysel çalışmada akışkanı hava olan silindir şeklinde bir ısı deposu kullanılmıştır. Bir varyaktan sağlanan ayarlanabilir elektrik enerjisi ile hava, depoya girmeden önce ısıtılmış, tam ısı deposuna gireceği noktada hava sıcaklığı bir termostat yardımıyla istenilen sıcaklıkta sabit tutulmuştur. Böylece ısıtılan hava bir güneş enerjisi sisteminde toplaçtan ısınmış olarak gelen havaya benzetilmiştir.

3.1.1. Deney Düzenegi

Deney düzenegi Şekil (1)' de şematik olarak gösterilmiştir. 0.105 m çapında, 0.53 m yüksekliğindeki bu silindirik depo, 0.05m kalınlığında cam yünü ile yalıtılmıştır. Deponun içinde rasgele yerleştirilmiş dolgu malzemesi bulunmaktadır. Değişik akım hızlarındaki hava bir kompresörden sağlanır. Havanın geçtiği boru içerisine yerleştirilen bir resistansa varyaktan ayarlanabilinen elektrik enerjisi ile havanın ısıtılması sağlanmıştır. İstenilen sıcaklığa kadar ısınan hava depoya verilmiştir. Isının geri kazanılması işlemi sırasında kompresörden gelen hava ısıtılmadan doğrudan depoya verilmiştir.

3.1.2. Dolgu Malzemesi

Dolgu malzemesi olarak yaklaşık 0.02m karakteristik çaplı kum dolu plastik tüpler kullanılmıştır. Dolgunun karakteristik çapı D_p , dolgu ile aynı yüzey hacim oranına sahip bir kürenin çapı olarak tanımlanır ve aşağıdaki eşitlikten hesaplanır.



Şekil 1 : Dolgulu yatak ısı deposu şematik görünüşü. Ta hava sıcaklığını ölçen termometrelerin yerleri, Td depo sıcaklığını ölçen ısı çiftlerinin yerleri.

$$D_p = 6 (1 - \epsilon) / a_p \quad (1)$$

(Eşitlik 1) de a_p dolgu alanının depo hacmine oranı, ϵ ise boşluk oranıdır. Plastik tüpler depoya rasgele yerleştirilmiştir. Dolgu madde si kumun özellikleri (Çizelge 2) de verilmiştir.

Çizelge 2. Dolgu maddesi kumun özellikleri (Perry, Chilton, 1972)

Dolgu maddesi	Yoğunluk (kg/m ³)	Isı Kapasitesi (J/kg-°C)	Isı İletkenliği (W/m-°C)
Kum	2300	798.4	0.329

Kullanılan plastik tüpün boyutları ve özellikleri:

$$\text{Çap, } D = 0.017 \text{ m}$$

$$\text{Yükseklik, } H = 0.027 \text{ m}$$

$$D_p = 0.02 \text{ m}$$

$$\text{Boş ağırlık} = 0.00248 \text{ kg}$$

$$\text{Dolu ağırlık} = 0.00732 \text{ kg}$$

$$\text{Kullanılan adet} = 368$$

$$\text{Boşluk oranı} = 0.47$$

$$C_p = 1423.2 \text{ J/kg-°C}$$

Dolgunun görünür yoğunluğu, , aşağıdaki işlemlerle hesaplanır.

$$\begin{aligned} & \text{Toplam dolgu kütlesi} = 0.00732 * 368 \\ & = \frac{\text{Toplam hacim } (1 - \epsilon)}{3.14 * (0.105^2 / 4) * 0.53 * (1 - 0.47)} \\ & = 1100 \text{ kg /m}^3 \end{aligned}$$

3.1.3 Düzenegın Kontrolu

Hava sıcaklığı sisteme girişte, depo boyunca dört ve sistemden çıkışta olmak üzere altı ayrı noktada yerleştirilen termometreler aracılığıyla okunmuştur. Dolgu sıcaklığı ise girişte, depo boyunca altı ve çıkışta olmak üzere sekiz noktaya yerleştirilen bakır-konstantan ısı çiftleri ile ölçülmüştür. Depo boyunca yerleştirilen ısı çiftlerinden

iki tanesi, plastik tüpün içinde en orta ve dışa en yakın noktaya gelecek şekilde yerleştirilmiştir. Böylece tüpün içinde sıcaklık gradienti olup olmadığı da gözlenmiştir. Isıl çiftleriyle sıcaklık ölçümleri mili-volt okuma hassasiyetinde yapılmıştır. Mili-volt değerlerini sıcaklığa çevirmek için isi pillerinin aşağıdaki kalibrasyon doğruları kullanılır.

$$y = mx + c \quad (2)$$

(Eşitlik 2) 'deki m ve c değerlerini hesaplamak için en küçük kareler metodu kullanılarak bir komputer programı yazılmıştır. Çesitli akım hızlarındaki hava bir kompresörden sağlanmıştır. Akım hızları önceden kalibre edilmiş GA Platon Ltd. yapımı 14-50/HS göstergeli bir rotametre ile ölçülmüştür. Standart kalibrasyon eğrisinden yararlanarak rotametreden okunan belli bir Q hava akış hızının lit/dak cinsinden standart koşullardaki hacmi bulunur. Deney koşullarındaki hacmi bulmak için

$$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2} \quad (3)$$

eşitliği kullanılır. (Eşitlik 3) 'deki V1 standart koşullardaki havanın hacmi(lit/dak), T1 273 K, V2 deney koşullarındaki havanın hacmi(lit/dak), T2 deneydeki havanın giriş sıcaklığı(K) 'dır.

3.2. Hesaplama Yöntemleri

G ne  enerjisinde dolgulu yatakta ısı depolamasında akışkan olarak hava kullanılır. Bu tip sistemlerde genel olarak tek-fazlı ve iki-fazlı hesaplama modelleri uygulanır. İki modelin birbirine e de er olduğunu gösteren çalışmalar yapılmıştır (Vortmeyer ve Schaeffer,1974), fakat iki fazlı model her iki fazda (hava ve dolgu) olan ısı transferlerini ele aldığı için daha gerçekçidir. Her iki model için  esitli analitik (Riaz, 1977) ve nümerik (Hughes ve ark.,1976,Farber ve Coutier,1982)   z mler önerilmiştir.

3.2.1. Nümerik Çözüm 1

Bu nümerik yaklaşıma (Farber ve Coutier,1982) göre, L uzunluğundaki dolgulu yatak N eşit bölüme bölünmüştür. Herhangi bir i bölümünde, yatak sıcaklığı $T_{d,i}$ olarak alınabilir. Bu durumda o bölüm için Biot sayısı, $Bi=h D_p/k_d$, 0.1 'den küçük olmalıdır. Buradaki $h(W/m^2\cdot C)$ dolgu ve hava arasındaki ısı transfer katsayısı, D_p dolgu için karakteristik çap ve $k_d (W/m^2\cdot C)$ dolgunun ısı iletkenliğidir. Bu i bölümü için enerji denkliği şu şekilde kurulabilir.

$$(\rho' C A \Delta x) \frac{dT_{d,i}}{dt} = h v A \Delta x (T_{a,i-1} - T_{d,i}) - Q_{L,i} + k_d A \Delta x \frac{d^2 T_d}{dx^2} \quad (4)$$

A yatak kesit alanı, ρ' dolgu yoğunluğu, görünür yoğunluk $(1-\epsilon)\rho$, ve C_d dolgunun ısı kapasitesidir. Q_L terimi ise çevreye olan ısı kayıplarını gösterir. Eşitlikteki en son terim yatağın ısı iletkenliğinin katkısını göstermektedir. Nümerik çözüm I'de bu terim ihmal edilmiştir. Yatak ile hava arasındaki ısı transfer katsayısı, h_v , Löff ve Hawley tarafından önerilen şu eşitlikle hesaplanmıştır.

$$h_v = 652 (G / D_p)^{0.7} \quad (5)$$

$G (kg/m^2 \cdot s)$ havanın birim alandaki kütle akış hızı, $D_p (m)$ dolgunun karakteristik çapıdır. Havanın ısı kapasitesi dolgu maddesine oranla ihmal edilebileceğinden i bölmesindeki hava sıcaklığı, $T_{a,i}$, hava kütle akım hızı $\dot{m} (kg/s)$ cinsinden verilebilir.

$$(\dot{m} C_p) a (T_{a,i-1} - T_{a,i}) = h_v A \Delta x (T_{a,i-1} - T_{d,i}) \quad (6)$$

(Eşitlik 6) 'nin nümerik bakımdan kararlı olabilmesi için Δx 'in şu eşitsizliğe uygun olması gerekir.

$$h_v A \Delta x / (\dot{m} C_p) a < 1 \quad (7)$$

Yatak sıcaklığının zamanla değişimi için nümerik türev alındığında şu eşitlik elde edilir.

$$\frac{dT_{d,i}}{dt} = \frac{T_{d,i,j+1} - T_{d,i,j}}{\Delta t} \quad (8)$$

4 , 6 ve 8 eşitlikleri tekrar düzenlendiğinde, hava ve yatak sıcaklıkları için iki denklem gurubu elde edilir.

$$T_{a,j,i} = T_{a,j,i-1} - \frac{h_v A \Delta x}{(m C_p) a} (T_{a,j,i-1} - T_{d,j,i}) \quad (9)$$

$$T_{d,j+1,i} = \frac{h_v A \Delta t}{(\rho C A) d} (T_{a,j,i-1} - T_{d,j,i}) - \frac{Q_{L,i} \Delta t}{(\rho C A) d \Delta x} + T_{d,j,i} \quad (10)$$

$$Q_{L,i}/A = U_L (T_{d,j,i} - T_{AT}) \quad (11)$$

(Eşitlik 9 ve 10) 'da kullanılan i girişten olan uzaklığı, j ise zaman aralıklarını vermektedir. Isı kaybı, Q_L , toplam kayıp katsayısı, U_L , ile yatak ve ortam arasındaki sıcaklık farkı çarpımı alınarak hesaplanabilir. T_{AT} ortam sıcaklığını göstermektedir. Silindir şeklinde depo için A 'nın logaritmik ortalaması (A_m) alınır. A_2 silindirin dış, A_1 ise iç yüzey alanıdır.

$$A_m = \frac{A_2 - A_1}{\ln(A_2/A_1)} \quad (12)$$

Geri kazanma için de benzer denklemler çıkarılır.

3.2.2 Numerik Çözüm 2 (Model II)

İkinci model için yatağın ısı iletkenliği de hesaba katılır. Yatak sıcaklığının uzaklıkla olan değişiminin ikinci türevi numerik olarak şu şekilde alınır.

$$\frac{d^2 T_d}{dx^2} = \frac{T_{d,j,i+1} - 2 T_{d,j,i} + T_{d,j,i-1}}{(\Delta x)^2} \quad (13)$$

Bu terim Eşitlik 10 ' a yerleştirildiğinde dolgu sıcaklığı için N tane denklemi olan şu denklem gurubu elde edilir.

$$T_{d,j+1,i} = \frac{h\nu A \Delta t}{(\rho C A)d} (T_{a,j,i-1} - T_{d,j,i}) - \frac{\theta_{L,i} \Delta t}{(\rho C A)d \Delta x} + T_{d,j,i} + \frac{k A \Delta t}{(\rho C A)d} \frac{(T_{d,j,i+1} - 2 T_{d,j,i} + T_{d,j,i-1})}{(\Delta x)^2} \quad (14)$$

Model I için (Eşitlik 9 ve 10) 'u, Model II için ise (Eşitlik 9 ve 14) 'ü beraber çözen bir bilgisayar programı yazılmıştır. Hava ve dolgu sıcaklıklarının zamanla ve uzaklıkla olan değişimleri depolama ve geri kazanma işlemleri için hesaplanmıştır. Bilgisayar programından elde edilen sonuçlar Ek 2 'dedir.

3.2.3. Analitik Metod (Model III).

Burada Riaz tarafından 1977 'de geliştirilen Tek Fazlı İletkenlik Modeli uygulanmıştır. Bu model, iki fazlı modelden $h\nu$ 'nin sonsuza yaklaştığı kabul edilerek çıkarılmıştır. Birimsiz sıcaklığın x ve t ile değişimi:

$$T(x,t) = 0.5 \operatorname{erfc} \frac{x-t}{2\sqrt{t}} + (t/\pi)^{1/2} e^{-\frac{(x-t)^2}{4t}} - 0.5 (1+x+t) e^x \operatorname{erfc} \frac{x+t}{2\sqrt{t}} \quad (15)$$

erfc hata fonksiyonunu göstermektedir. Bu fonksiyonun değerleri Hodgman ve ark.(1961) 'dan alınmıştır. x ve t değerlerinin hesaplanması için şu eşitliklerden yararlanılır.

$$x = \xi/\lambda \quad t = \tau/\theta \quad (16,17)$$

$$\lambda_{eq} = \lambda_1 + \lambda_2 = \frac{v_a \rho_a C_a}{h_{eq}} = \frac{k_{eq}}{v_a \rho_a C_a} \quad (18)$$

$$\theta_{eq} = \theta_1 + \theta_2 = \frac{d C_d}{h_{eq}} = \frac{k_{eq} \rho_d C_d}{(v_a \rho_a C_a)^2} \quad (19)$$

$$\frac{1}{h_{eq}} = \frac{1}{h\nu} + \frac{k_d}{(v_a \rho_a C_a)^2} \quad (20)$$

$$k_{eq} = k_d + \frac{(v a \rho_a C_a)^2}{h v} \quad (21)$$

ξ uzunluk, τ zaman, λ karakteristik uzunluk, θ karakteristik zaman, v hava akım hızı, ρ_a hava yoğunluğu, C_a havanın ısı kapasitesi, ρ_d dolgunun yoğunluğu, C_d dolgunun ısı kapasitesi, k_d dolgunun ısı iletkenliği, $h v$ hacimsel ısı transfer katsayısını göstermektedir. Bu değerler hesaplandıktan sonra $T(x,t)$ (Eşitlik 15) 'ten hesaplanır. Bu hesaplamalar sırasında Lotus 1,2,3 hazır programından yararlanılmıştır.

3.2.4. Tabakalaşma Katsayısının Hesaplanması

Isı deposunun giren sıcak hava soğuyarak yukarı çıktığından yatak boyunca ısı tabakalaşması meydana gelir. Isı tabakaları deponun en altında en sıcak, en üstünde de en soğuk olacak şekildedir. Depodan toplaca geri dönen soğuk hava toplaç sıcaklığını düşürerek verimi arttırır. Isının geri kazanılması sırasında ise hava deponun en sıcak bölgesi olan alttan çıkarken elde edilebilecek en sıcak hava kazanılmış olur. Bu nedenle tabakalaşma deponun verimini yükselten bir faktördür. Depo yüksekliği ve çapı tabakalaşmaya zarar verilmeyecek şekilde seçilmelidir.

Tabakalaşmanın sistem üzerindeki etkisini görebilmek için tabakalaşma katsayısı, K_s hesaplanır (Phillips,1981). K_s , gerçekte elde edilen faydalı enerjinin yatak sıcaklığı sabit tutulduğunda elde edilecek enerjiye oranıdır. K_s bir sistem sabitidir; yani çalışma koşullarından bağımsızdır. Tabakalaşma katsayısı K_s , toplacın ısı değiştirme etkinliği E ve karıştırma sayısı M arasındaki ilişki aşağıdaki eşitlikle verilir.

$$\frac{K_s(1 - E)(R_2 - R_1)}{R_2(1 - MR_1)e^{-R_1} - R_1(1 - MR_2)e^{-R_2}} = K_s \quad (22)$$

(Eşitlik 21) deneme yanılma metoduyla çözülebilir. Bu eşitlikteki diğer sabitler aşağıdaki eşitliklerden hesaplanır.

$$R1 = \alpha + \beta \quad R2 = \alpha - \beta \quad (23,24)$$

$$\alpha = 1/2M \quad \beta = ((1 - 4EMKs)^{1/2})/2M \quad (25,26)$$

$$E = Fr Ar U1 / C' \quad (27)$$

$$M = Mk + 1/Ns \quad (28)$$

$$Mk = Ac k / C'H \quad (29)$$

$$Ns = H Ac hv / C' \quad (30)$$

Fr birimsiz toplaçtan ısı elde etme faktörü, Ar toplacın alıcı alanı (m^2), U1 alıcı ve ortam arasındaki toplam ısı transfer katsayısı (W/m^2-K), C' kütle akım hızı ısı kapasitesi çarpımı (W/K), Mk yatak için birimsiz iletkenlik sayısı, Ns transfer birimleri sayısı, Ac yatak kesit alanı (m^2), k yatağın ısı iletkenliği ($W/m-K$), H yatak yüksekliği (m) ve hv de hacimsel ısı transfer katsayısı (W/m^3-K) 'dir. Hava ısıtmalı güneş enerjisi sistemlerinin hemen hepsinde M , E ve Ks aşağıdaki sınırlar içindedir.

$$0 < M < 0.1$$

$$0.01 < E < 0.5$$

$$1.0 < Ks < 1.4$$

$M < 0.1$ olduğu zaman (Eşitlik 22) daha basit hale gelir.

$$\frac{\ln(1/(1-E))}{(1+M \ln(1/(1-E))) E} = Ks \quad (31)$$

Kum dolgu için (Eşitlik 31) ' den yararlanılarak, deneme yanılma metoduyla Ks değeri hesaplanmıştır.

3.2.5. Depolama Veriminin Hesaplanması

Isı deposunun performansını belirlemek için depolama verimi aşağıdaki eşitlikten hesaplanabilir (Farber ve Coutier1982).

$$\eta_s = \frac{Q_s}{Q_c} = \frac{\int_0^t Q_d (1 - e^{-\epsilon}) V (\Delta T)_d}{G A C_a (\Delta T)_a t_c} = \frac{(\Delta T)_d}{(\Delta T)_a} \quad (32)$$

(Eşitlik 32) 'deki $(\Delta T)_d$, bir t anındaki dolgu ortalama sıcaklığı ile dış ortam sıcaklık farkını, $(\Delta T)_a$ ise havanın sıcaklığındaki düşmeyi, t_c ise toplam depolama süresini gösterir. Q_s depolanan enerji miktarını, Q_c de havanın taşıdığı kullanılabilir enerji miktarını verir. Q_s , kumda ve plastik tüpte depolanan enerjiye eşittir.

$$Q_s = (Q_s)_{\text{kum}} + (Q_s)_{\text{tüp}} = (\dot{m}_{\text{kum}} C_{\text{kum}} + \dot{m}_{\text{tüp}} C_{\text{tüp}}) (\Delta T)_d \quad (33)$$

Hava akım hızı ve giriş sıcaklıklarının depolama verimi üzerindeki etkileri incelenmiştir.

3.2.6 Büyük Skalalı Isı Deposu Tasarımı

Nümerik modelden elde edilen sonuçlar daha büyük skalalı bir sistem tasarımıda kullanılabilir. Bu tasarım sırasında izlenecek yol dört grupta incelenebilir. (Farber ve Coutier, 1982)

1. Dolgu hacminin belirlenmesi: Q_y , toplam enerji miktarı, n ise depolamanın günü (ya da saati) olarak bilinir. Toplaç birim alanına düşen enerji miktarı hava koşullarından belirlenir. Toplaç alanı Q_y 'nin istenen belli bir oranını toplayacak şekilde seçilir. Q_c , günlük (ya da saatlik) kullanılabilir enerji miktarıdır. Bir günlük (ya da saatlik) işlem sırasında Q_c 'nin ne kadarının depolanacağı, tasarımcının seçeceği η_s değerine bağlıdır. Depolanan enerji miktarı Q_s , aşağıdaki eşitlikten verilir.

$$Q_s = \eta_s Q_c$$

Burada seçilmesi gereken diğer bir parametre de, depo tankı ve ortam arasındaki sıcaklık farkı ortalaması olan $(\Delta T)_d$ 'dir. Dolgunun ısı depolama kapasitesi aşağıdaki eşitlikle tanımlanır.

$$n Q_s = \int d C_d (1 - \epsilon) V (\Delta T)_d \quad (34)$$

Buradan da dolgu hacmi için şu eşitlik elde edilir.

$$V = A H = \frac{n Q_s}{\int d C_d (1 - \epsilon) (\Delta T)_d} \quad (35)$$

2. (G , Dp) çiftinin seçimi: Bu seçimi yaparken şu üç noktaya dikkat etmek gerekir.

a) Yataktaki basınç düşmesi mümkün olduğu kadar düşük tutulmalıdır.

b) $|T_a - T_s|$ farkının küçük olabilmesi için ısı transfer katsayısı, h_v büyük olmalıdır.

c) Hava sıcaklığı, seçilmiş $(\Delta T)_d$ değerine uygun olmalıdır.

Üfleç için harcanan enerjiye dolgunun katkısı şu eşitlikle verilebilir.

$$Q_b = \frac{1}{\eta_b} G_c \frac{\Delta P (G A / \int a)}{6350} t_c \quad (36)$$

Dolgulu yatakta basınç düşmesiyle ilgili bir eşitlik Dunkle ve Efful (1972) tarafından verilmiştir.

$$\Delta P = \frac{21 G^2 L}{\int a D_p} + \frac{1750 \mu_a G L}{\int a D_p^2} \quad (37)$$

$$Q_b = \frac{1.6 \cdot 10^{10} t_c}{\eta_b} V (21 G^3 / D_p + 82 G^2 / D_p^2) \quad (38)$$

t_c ve η_b belirlendikten sonra, birinci kısımda hesaplanan V değeri de kullanılarak, Q_b 'nin G ve D_p ile değişimini gösteren grafik çizilebilir. G ve D_p çifti, Q_b değerinin maksimum enerji miktarının % 1 - 10 'unu geçmeyecek şekilde seçilmelidir.

3. Optimal yatak uzunluğunun belirlenmesi: Birimsiz uzaklık ve zaman değerleri aşağıdaki gibi tanımlanır.

$$Y \text{ (Birimsiz uzaklık)} = \frac{h_v}{G Ca} x = \alpha x \quad (39)$$

$$Z \text{ (Birimsiz zaman)} = \frac{h\nu}{\int d C_d (1 - \epsilon)} t = \beta t \quad (40)$$

Nümerik modelden elde edilen eğrilerin herbiri bir x noktasına dolayısıyla da bir Y 'ye karşı gelmektedir. x aksisinde zamani gösterdiği için Z aksisi denebilir. Y eğrilerinin birbirlerini kestiği noktalar için şu eşitlik yazılabilir.

$$Y = Z \quad \text{ya da} \quad \alpha L = \beta t_c \quad (41)$$

Yatak uzunluğunu veren eşitlik de buradan çıkarılır.

$$L = \frac{\beta}{\alpha} t_c = \frac{G C_a}{\int s C_s (1 - \epsilon)} t_c \quad (42)$$

4. A yüzeyinin hesaplanması: V ve L değerleri hesaplandıktan sonra $V = A L$ eşitliğinden A değeri kolaylıkla hesaplanır.

Seçilen parametrelerin doğruluğu için şu ispatlar yapılmalıdır.

a) Ortalama yatak sıcaklığı birinci kısımda alınan değere yakın olmalıdır.

b) Q_s / Q_c oranı tasarım için seçilen değere yakın olmalıdır.

c) Hava sıcaklığı (ΔT) d 'yi karşılayacak dereceye ulaşabilmelidir.

Bu metodun uygulandığı daha büyük skalalı bir isi deposu tasarımı verilmiştir.

3.2.6. Basınç Düşmesinin (ΔP) Hesaplanması

Dolgulu yatakta basınç düşmesi, Dunkle ve Efful (1972) tarafından önerilen, daha öncede belirtilmiş olan (Eşitlik 37) ' den çeşitli akım hızları için hesaplanır.

$$\Delta P = \frac{21}{\gamma_a} \frac{G^2 L}{D_p} + \frac{1750 \mu_a}{\gamma_a} \frac{G L}{D_p^2} \quad (37)$$

G (lb/ft² -s) hava akım hızı, L (ft) yükseklik, γ_a (lb/ft³) havanın yoğunluğu, μ_a (lb/ft-s) havanın viskozitesi ve Dp (ft) dolgu için karakteristik çaptır.

4. ARASTIRMA BULGULARI VE TARTISMA

Deneyler 0.105 m ϕ apında, 0.53 m yüksekliğinde ve 0.05 m kalınlığında cam yünü ile yalıtılmış ısı deposu üzerinde yapılmıştır. Dolgu maddesi olarak yaklaşık 0.02 m karakteristik ϕ aplı plastik tüpler içerisindeki kum kullanılmıştır. Depolama sırasında kullanılan hava akım hızları ve giriş sıcaklıkları Çizelge 3 'te verilmiştir.

Çizelge 3: Depolama işlemi için kullanılan hava akım hızları ve giriş sıcaklıkları. TAL hava giriş sıcaklığı, Q rotametreden okunan değer

Deney No	Q	V (lit/dak)	TAL (°C)
1	9	113.45	75
2	9	110.14	65
3	9	106.99	55
4	9	103.67	45
5	7	86.68	75
6	7	85.44	70
7	7	84.19	65
8	7	81.70	55
9	7	79.21	45
10	6	69.68	55
11	5	61.18	75
12	5	59.42	65
13	5	57.67	55
14	3	35.69	75
15	3	34.66	65
16	3	33.64	55

Isının geri kazanılması deneyleri ise Çizelge 4 'te gösterilen hava akım hızları ve giriş sıcaklıklarında yapılmıştır.

Çizelge 4: Geri kazanma işlemi için kullanılan hava akım hızları ve giriş sıcaklıkları. TAO hava giriş sıcaklığı.

Deney No	Q	V(lit/dak)	TAO (°C)
1	9	93.07	12.5
2	7	73.23	21.0
3	5	50.72	15.5

Bu çalışma şartlarında, depo boyunca sıcaklık dağılımları zamana bağlı olarak çıkarılmıştır. Sıcaklık dağılımlarının grafiğe geçirilmesi sırasında kullanılan birimsiz sıcaklıklar aşağıdaki eşitliklerden hesaplanır.

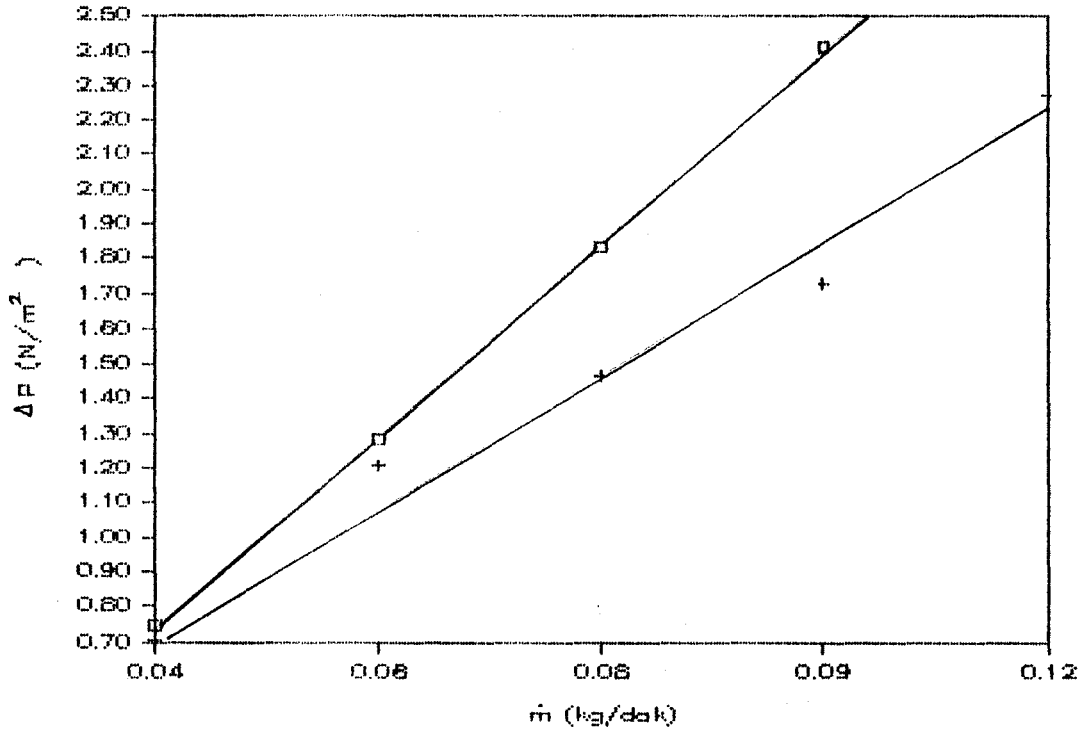
$$TBA \text{ (Birimsiz hava sıcaklığı)} = \frac{T_{a,j,i} - TAT}{T_{a,max} - TAT}$$

$$TBD \text{ (Birimsiz depo sıcaklığı)} = \frac{T_{d,j,i} - TAT}{T_{d,max} - TAT}$$

$T_{a,max}$ ve $T_{d,max}$ sırasıyla havanın ve deponun ulaşabileceği maksimum sıcaklıktır ve TAL 'ye eşittir.

Deney sonuçları numerik çözüm 1 (Model I), numerik çözüm 2 (Model II) ve analitik çözüm (Model III) ' den elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır.

Yatak boyunca basınç düşmesiyle hava akım hızı arasındaki ilişki Şekil 2 'de gösterilmiştir. 0.04 - 0.12 kg/dak hava akım hızları arasında basınç düşmesi 0.75 - 2.41 N/m² arasındadır. Basınç değerlerinin oldukça düşük olması kompresör için gerekli enerji miktarının fazla olmadığını gösterir.



Şekil 2. Yatak boyunca basınç düşmesiyle hava akım hızı arasındaki ilişki.

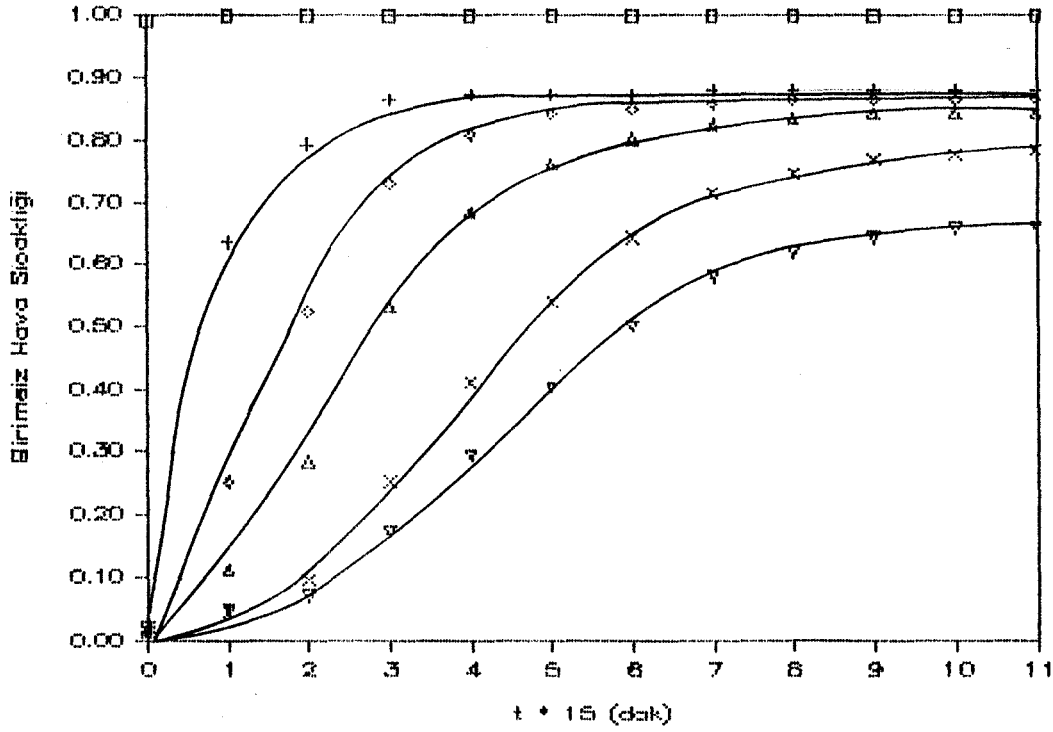
□ TAL = 75 °C + TAL = 55 °C

Deneyler sırasında hava sıcaklıkları 6 ayrı noktada termometrelerle, dolgu sıcaklıkları da 8 ayrı noktada bakır-konstantan ısı çiftleriyle ölçülmüştür. Hava akım hızları ölçümleri rotametre ile yapılmıştır. Ölçümlerle ilgili çizelgeler Ek 1 'de verilmiştir.

Deneysel sonuçlardan elde edilen sıcaklık dağılımları Şekil (3-11) 'da gösterilmiştir. Şekil 3 ve 6 'da değişik işletme şartlarında depolama için hava sıcaklık dağılımları, Şekil 4 ve 7 'de depo sıcaklık dağılımları verilmiştir.

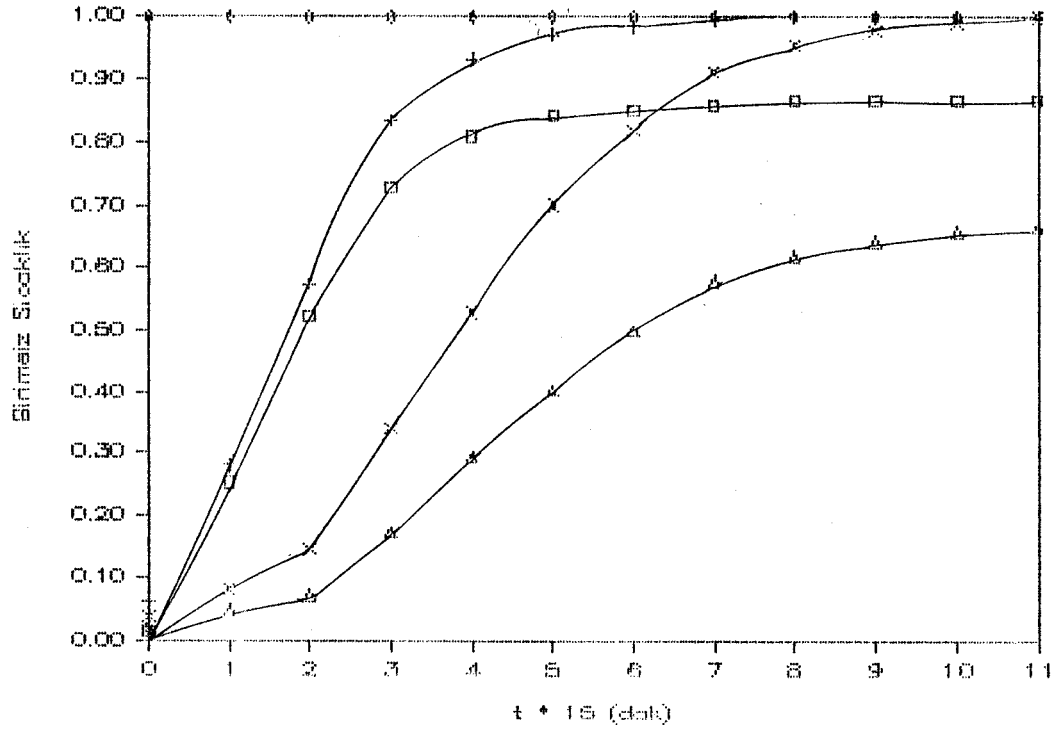
Depolama işlemi sırasında giriş bölgesinde hem hava hem de dolgu sıcaklıklarında hızlı bir artış olmaktadır. Bunun nedeni bu bölgedeki sıcaklık gradientinin yüksek olmasıdır. Depo boyunca ilerledikçe sıcaklıklardaki artış yavaşlamakta ve ısı kayıplarından dolayı elde edilen maksimum sıcaklık değerleri de düşmektedir. Şekil 3 'te $x = 0.04$ cm 'de maksimum birimsiz hava sıcaklığı 0.880 değerine 45 dakikada ulaşılmışken, $x = 0.53$ cm 'de maksimum 0.660 değerine ancak 165 dakikada ulaşılmıştır. Dolgu tüpleri içinde sıcaklık gradienti olup olmadığını anlamak için $x = 0.28$ cm 'de tüpün ortasına ve dışına gelecek şekilde iki ısı çifti yerleştirilmiştir. Şekil 4 'te bu ısı çiftlerinden elde edilen sıcaklık dağılımlarının birbirine çok yakın olduğu görülmektedir. Bu da sıcaklık gradientinin çok az olduğunu gösterir. Şekil 5 'te depolama işlemi için birimsiz hava sıcaklıklarıyla birimsiz depo sıcaklıkları iki ayrı x 'te karşılaştırılmıştır. Girişe yakın bölgede depo sıcaklığı ile hava sıcaklığı, birbirlerine yakın olmakla beraber, hava soğuyarak çıktığı için çıkışta depo sıcaklığı havadan daha yüksektir.

Şekil (8-11) 'de değişik işletme şartlarında geri kazanma işlemi için hava ve depo sıcaklık dağılımları verilmiştir. Giriş bölgesinde, soğuk havayla sıcak depo arasındaki sıcaklık farkının büyük olması ısı transferini arttırmaktadır. Depo sıcaklığının hızla düşmesinin nedeni budur.



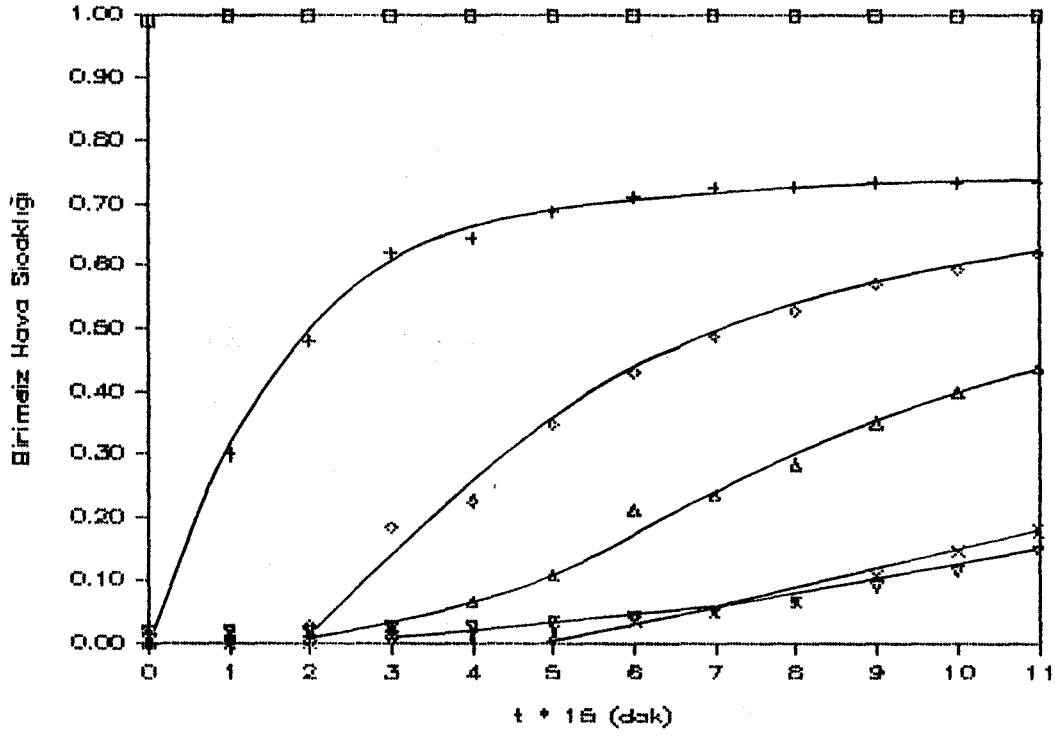
Şekil 3: Deneysel birimsiz hava sıcaklığının x ve t ile değişimi. $\theta = 9$, $TAL = 75^\circ C$

□ 0.0 + 0.04 m ◇ 0.18 m △ 0.34 m × 0.48 m ▽ 0.53 m



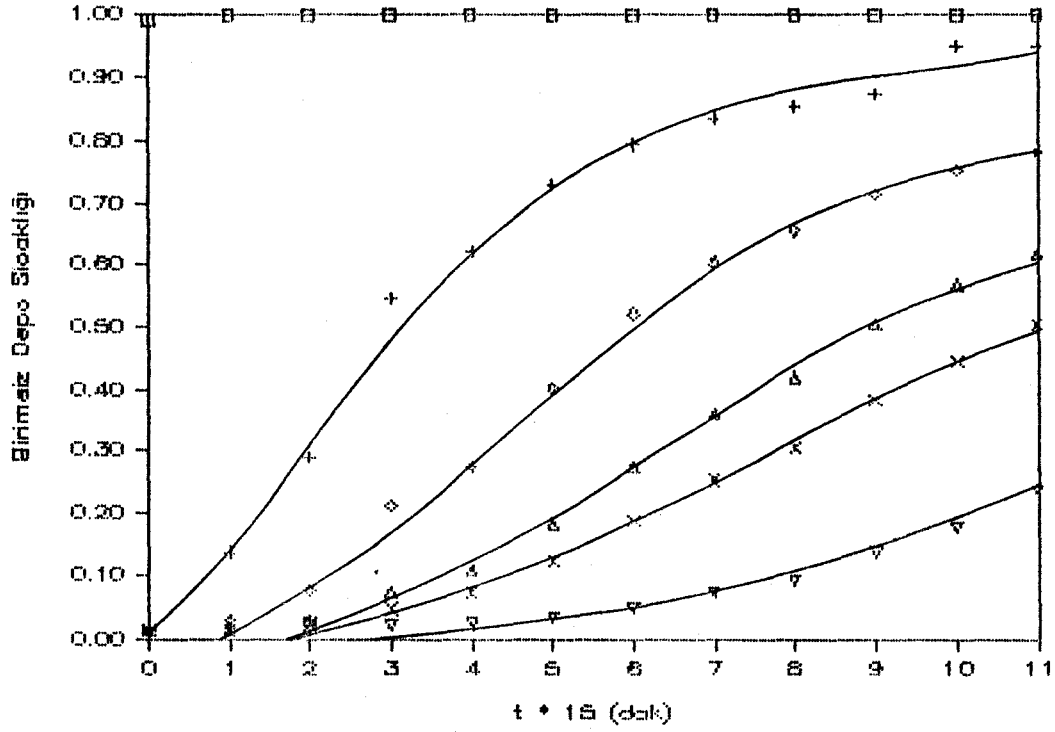
Şekil 5 : Birimsiz hava sıcaklığı ile birimsiz depo sıcaklığının karşılaştırılması. $Q = 9$, $TAL = 75^\circ C$

$\square$ 0.18 m (hava) $\times$ 0.18 m (depo) $\diamond$ 0.0
 $\triangle$ 0.53 m (hava) $\times$ 0.53 m (depo)



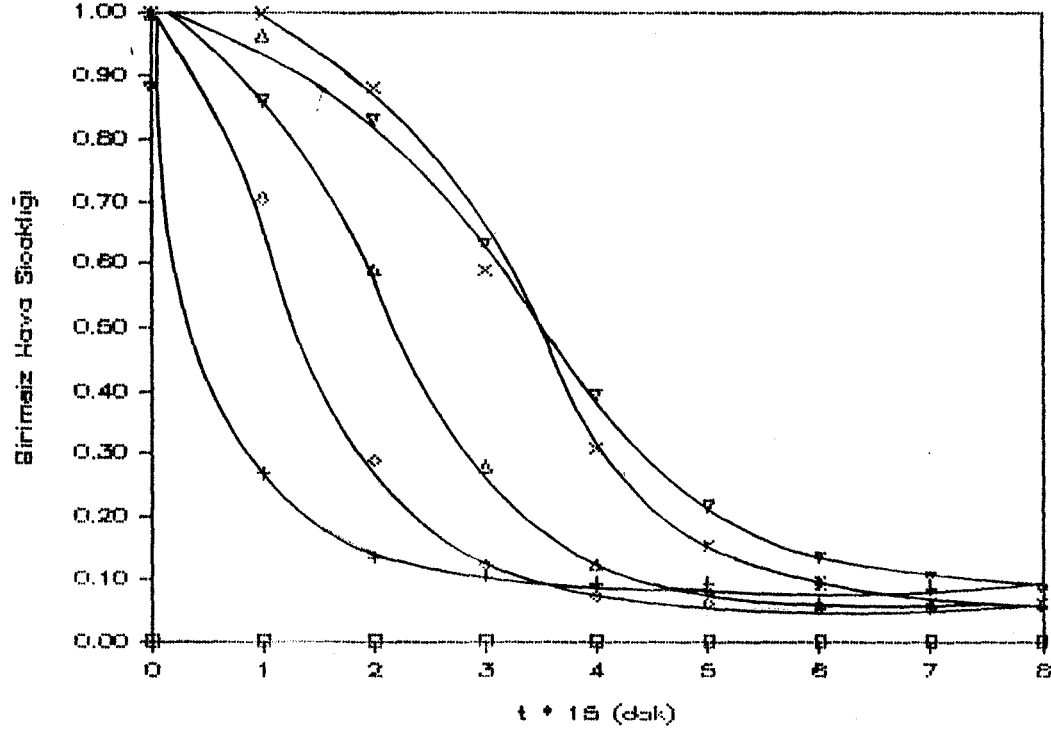
Şekil 6: Deneysel birimsiz hava sıcaklığının x ve t ile değişimi. $Q = 3$, $TAL = 75^\circ C$

$\square$ 0.0 $+$ 0.04 m $\diamond$ 0.18 m $\triangle$ 0.34 m $\times$ 0.48 m ∇ 0.53 m



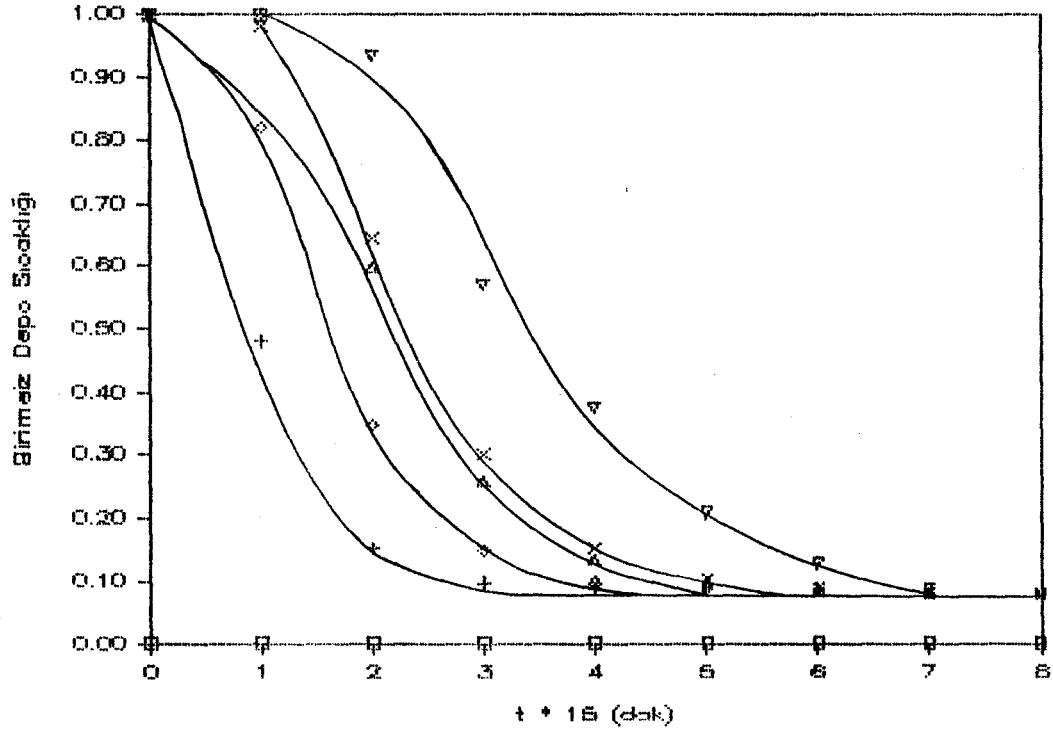
Şekil 7: Deneysel birimsiz depo sıcaklıklarınınin x ve t ile değişimi. $Q = 3$, $TAL = 75^{\circ}C$

□ 0.0 + 0.10 m ◇ 0.20 m △ 0.28 m × 0.48 m ▽ 0.53 m



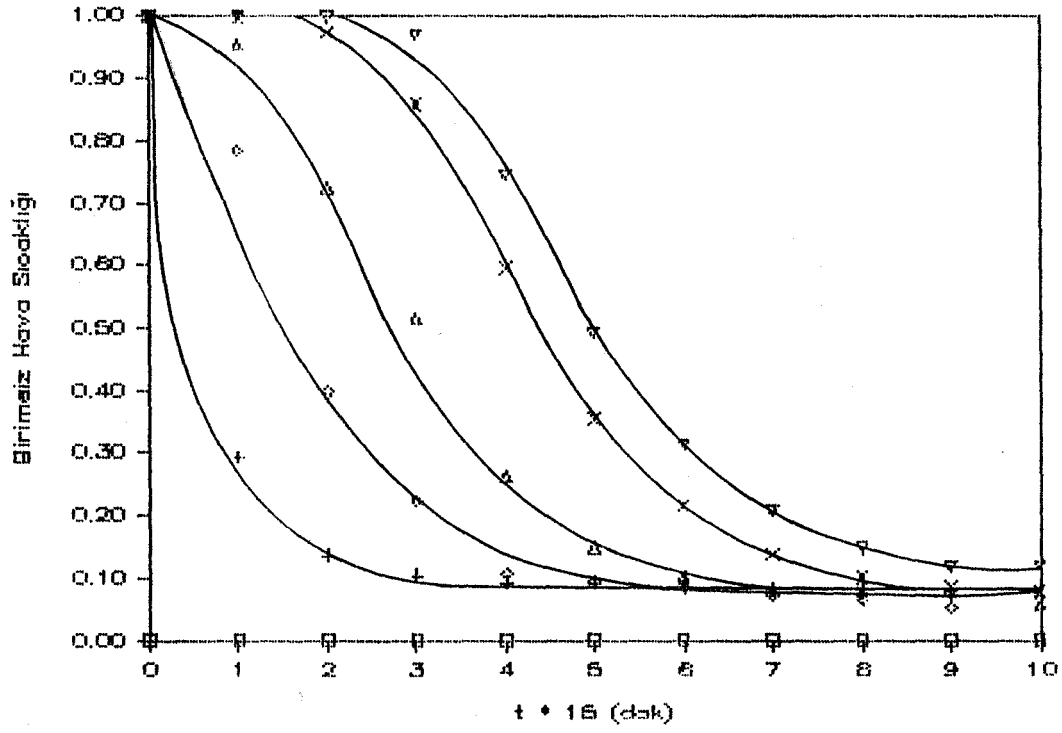
Şekil 8: Geri kazanma işlemi için deneysel birimsiz hava sıcaklığının x ve t ile değişimi. $Q = 9$, $TA0 = 12.5^{\circ}\text{C}$

$\square$ 0.0 + 0.04 m $\diamond$ 0.18 m
 $\triangle$ 0.34 m $\times$ 0.48 m ∇ 0.53 m



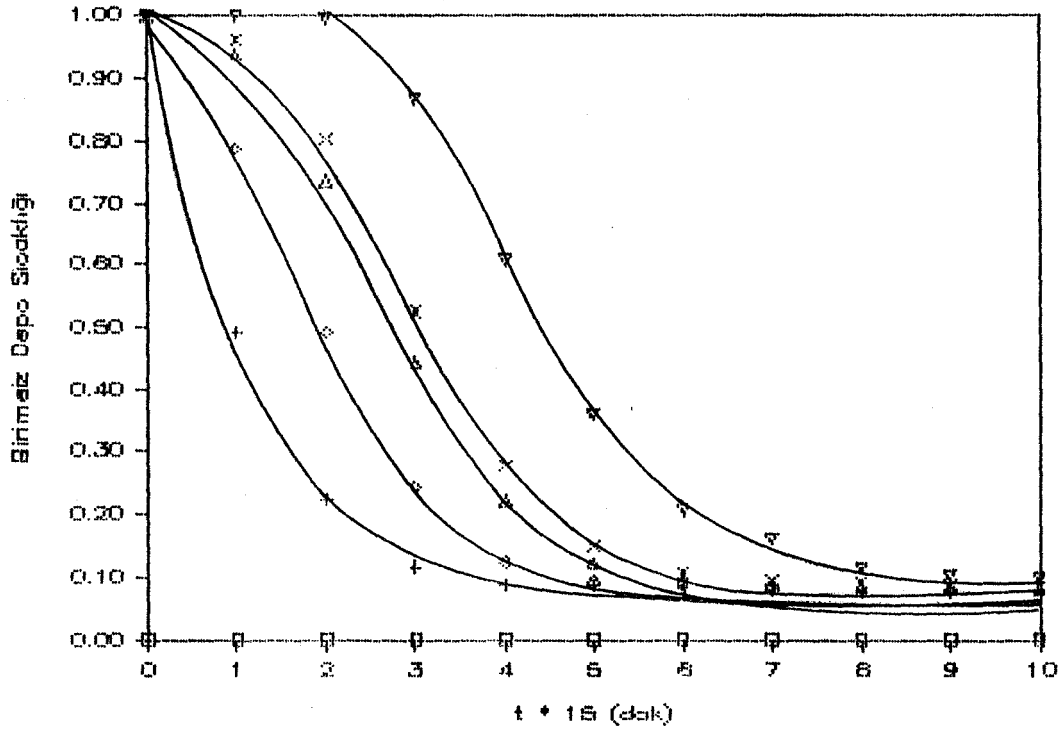
Şekil 9: Geri kazanma işlemi için deneysel birimsiz depo sıcaklığının x ve t ile değişimi. $Q = 9$, $TA0 = 12.5^{\circ}\text{C}$

□ 0.00 + 0.10 m ◇ 0.20 m
 △ 0.28 m × 0.48 m ▽ 0.53 m



Şekil 10: Geri kazanma işlemi için deneysel birimsiz hava sıcaklığının x ve t ile değişimi. $Q = 7$, $T_{AO} = 21^\circ\text{C}$

$\square$ 0.00 $+$ 0.04 m $\diamond$ 0.18 m
 $\triangle$ 0.34 m $\times$ 0.48 m ∇ 0.53 m



Şekil 11: Geri kazanma işlemi için deneysel birimsiz depo sıcaklığının x ve t ile değişimi. $Q = 7$, $T_{A0} = 21^\circ\text{C}$

$\square$ 0.0 $+$ 0.10 m $\diamond$ 0.20 m
 $\triangle$ 0.28 m $\times$ 0.48 m ∇ 0.53 m

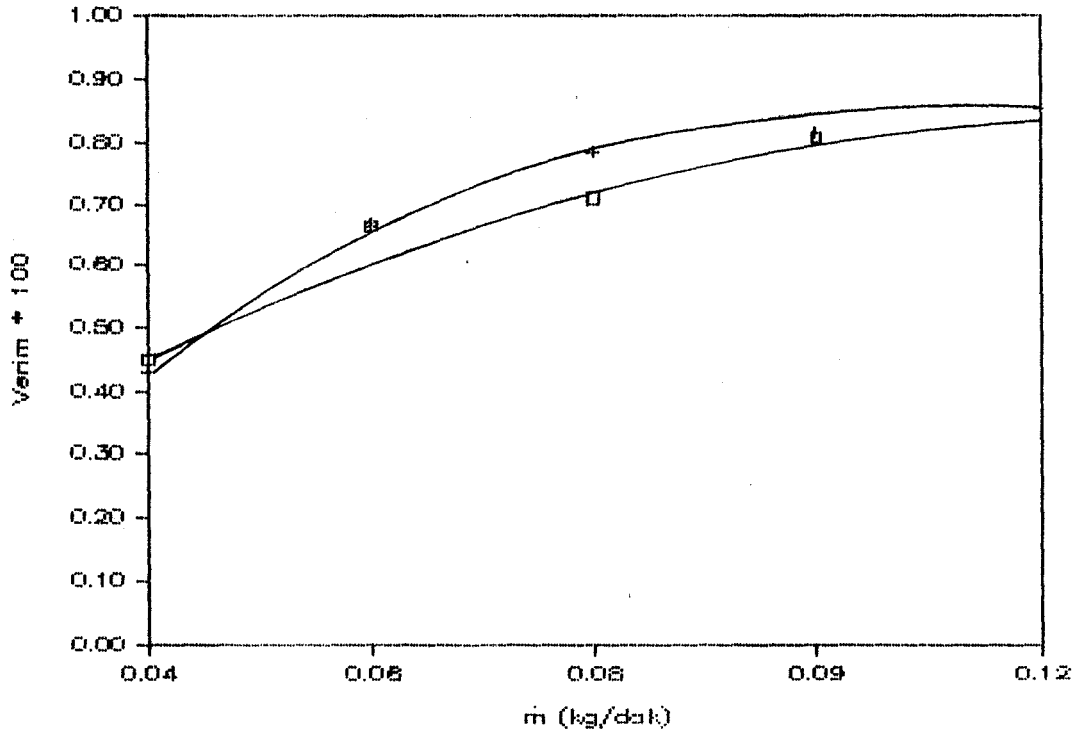
Depo çıkışına yaklaştıkça sıcaklığın düşme hızı azalır ve bir müddet sonra depo ve hava sıcaklıkları bir minimum sıcaklık değerine ulaşırlar. Geri kazanma, ısı transferinin en fazla olduğu zaman aralığında yapılmalıdır.

Isı deposunun performansını belirlemek için depolama verimi hesaplanmıştır. Hava giriş sıcaklığı 75 ve 45°C 'ler için depolama veriminin hava akım hızıyla olan ilişkisi Şekil 12 'de verilmiştir. Giriş sıcaklığı 75°C için en yüksek hava akım hızında, (0.12 kg/dak), depolama verimi 0.81' dir. Hava akım hızı düştükçe verim değerleri de düşmektedir. 45°C için daha düşük verimler hesaplanmıştır. Belli bir depolama verimi için gerekli hava akım hızı bu şekilden elde edilebilir.

İşletme şartlarının deneysel sonuçlar üzerindeki etkisi Şekil (13-16) 'da gösterilmiştir. Şekil 13 ve 14 'te hava akım hızının etkisi gösterilmiştir. Hava giriş sıcaklığı 75°C olduğunda hava akım hızı 113.45 lit/dak 'dan 35.69 lit/dak 'a düştüğü zaman sıcaklıklarda da büyük bir düşüş gözlenmektedir. Bunun nedeni hava akım hızının ısı transferini doğrudan etkilemesidir. Düşük akım hızlarında hacimsel ısı transfer katsayısı, h_v , daha düşük obcağından ısı transferi de azalır.

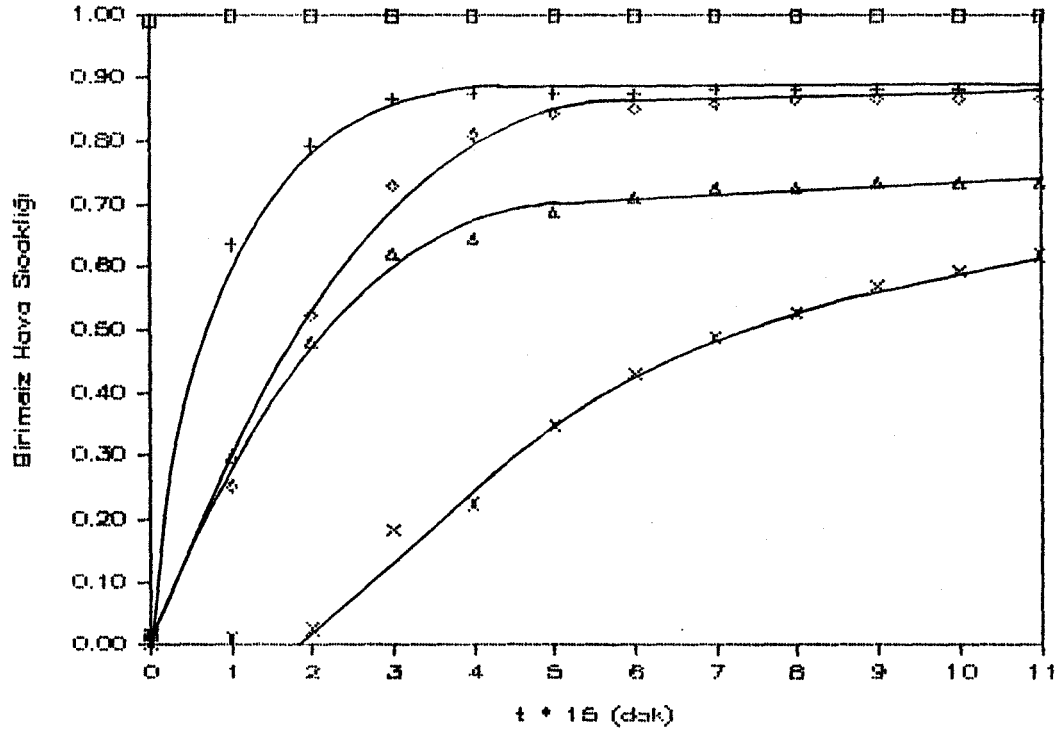
Şekil 15 ve 16 'da hava giriş sıcaklığının etkisi gösterilmiştir. Hava giriş sıcaklığı 45 'den 75°C 'ye yükselttiğinde birimsiz sıcaklıklarda az bir miktar düşüş meydana gelmektedir. Isı transferinde ortalama yatak sıcaklık farkı etkindir. Şekil 16 'da 75°C 'de $x = 0.34$ m 'de birimsiz sıcaklık farkı 0.841, 45°C 'de ise 0.890 'dır. Bu yüzden 45°C de daha yüksek sıcaklıklar elde edilir.

Deneysel sonuçlarla teorik modellerden elde edilen sonuçlar Şekil (17-19) 'da karşılaştırılmıştır. Numerik model 1 ve 2 'den elde edilen sonuçlar birbirinin aynıdır. Şekil 17 'de $x = 0.035$ m 'de, Şekil



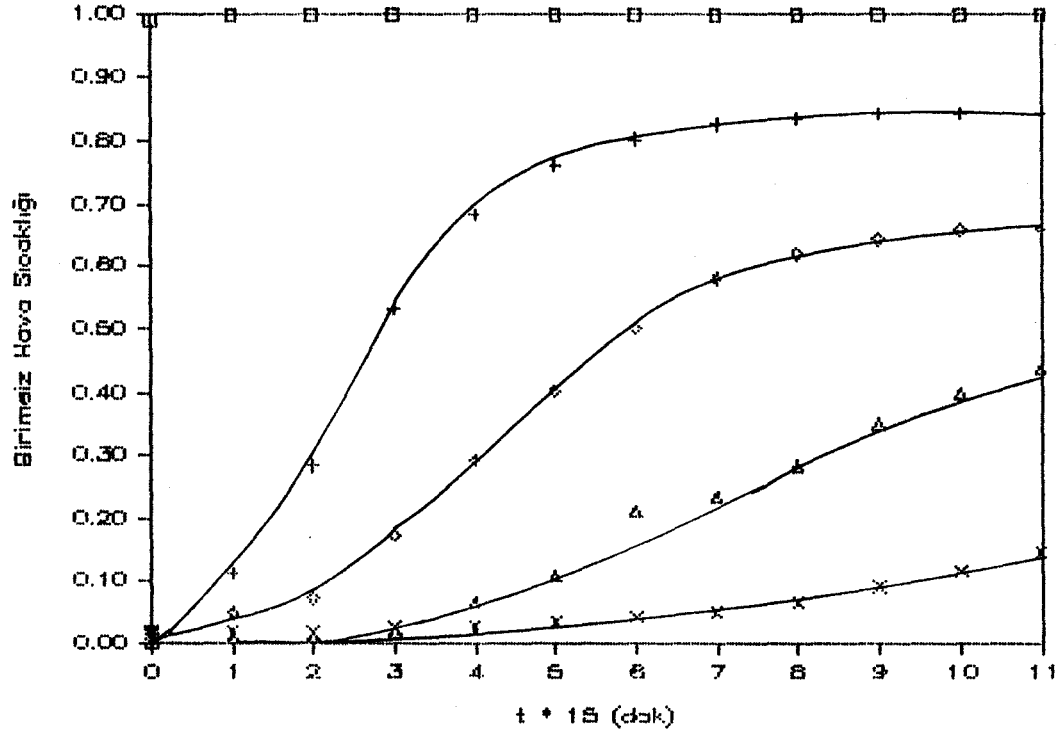
Şekil 12: Depolama veriminin hava akım hızıyla değişimi

□ 75°C +45°C



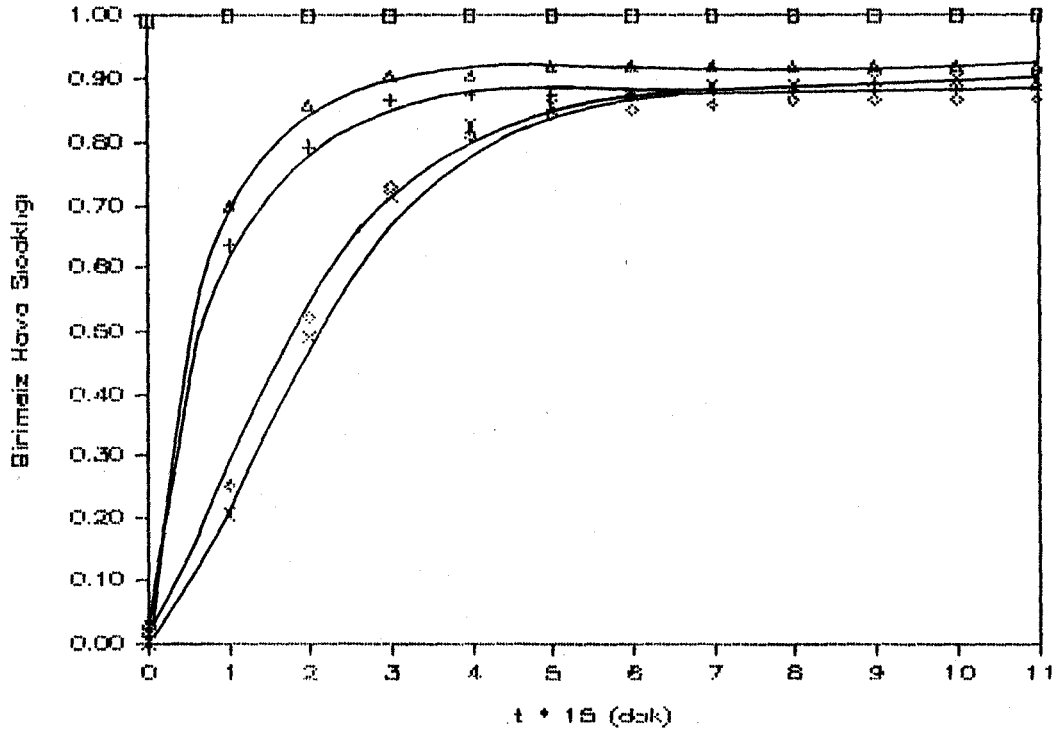
Sekil 13: Hava akım hızının deney sonuçları üzerindeki etkisi. $TAL = 75^{\circ}C$, $Q = 9, 3$, $x = 0.04, 0.18$ m

□ 0.0 + 0.04 m ($Q = 9$) ◇ 0.18 m ($Q = 9$)
 △ 0.04 m ($Q = 3$) × 0.18 m ($Q = 3$)



Şekil 14: Hava akım hızının deney sonuçları üzerindeki etkisi. TAL = 75°C , Q = 9 , 3 , x = 0.34 , 0.53 m

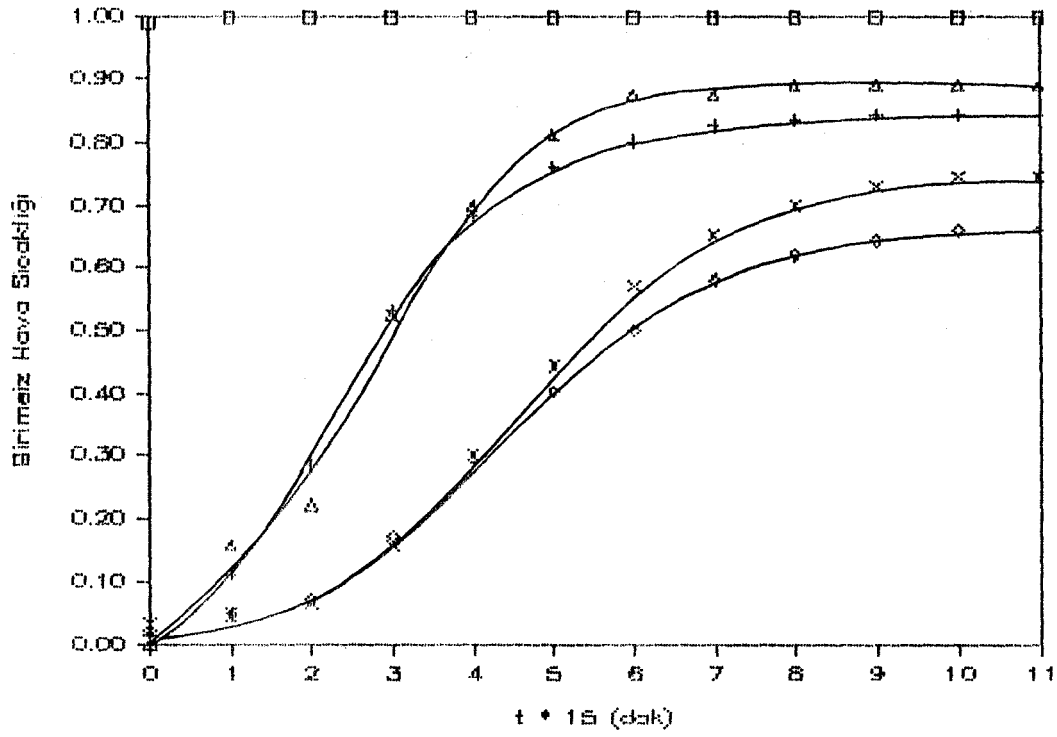
□ 0.0 + 0.34 m (Q = 9) ◇ 0.53 m (Q = 9)
 △ 0.34 m (Q = 3) × 0.53 m (Q = 3)



Şekil 15: Hava giriş sıcaklığının deney sonuçları

üzerindeki etkisi. $\phi = 9$, TAL = 75, 45°C

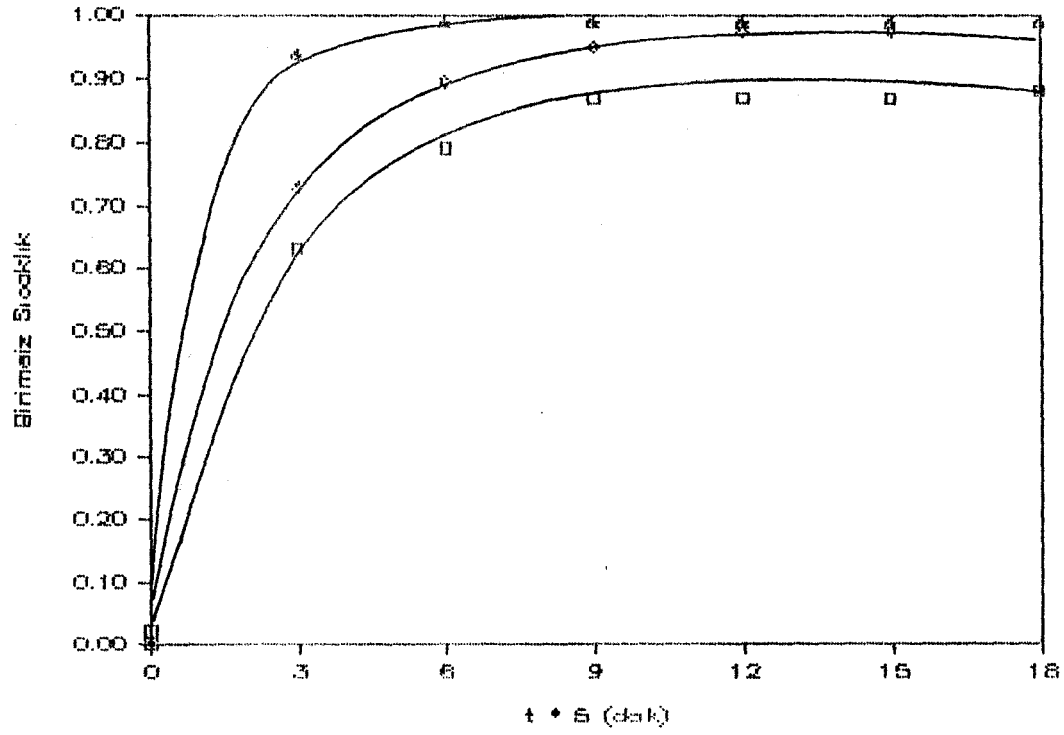
□ 0.0 + 0.04 m (TAL=75) ◇ 0.18 m (TAL=75)
 △ 0.04 m (TAL=45) × 0.18 m (TAL=45)



Şekil 16: Hava giriş sıcaklığının deney sonuçları

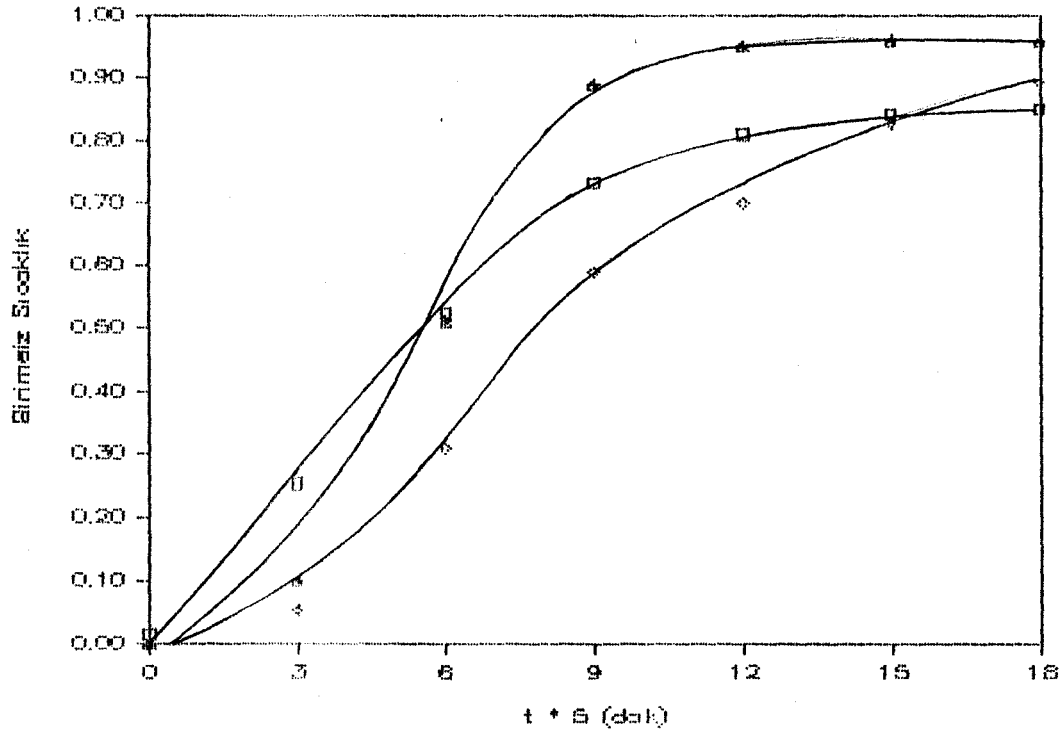
üzerindeki etkisi. $Q = 9$, $TAL = 75$, $45^{\circ}C$

□ 0.0 + 0.34 m (TAL=75) ◇ 0.53 m (TAL=75)
 △ 0.34 m (TAL=45) × 0.53 m (TAL=45)



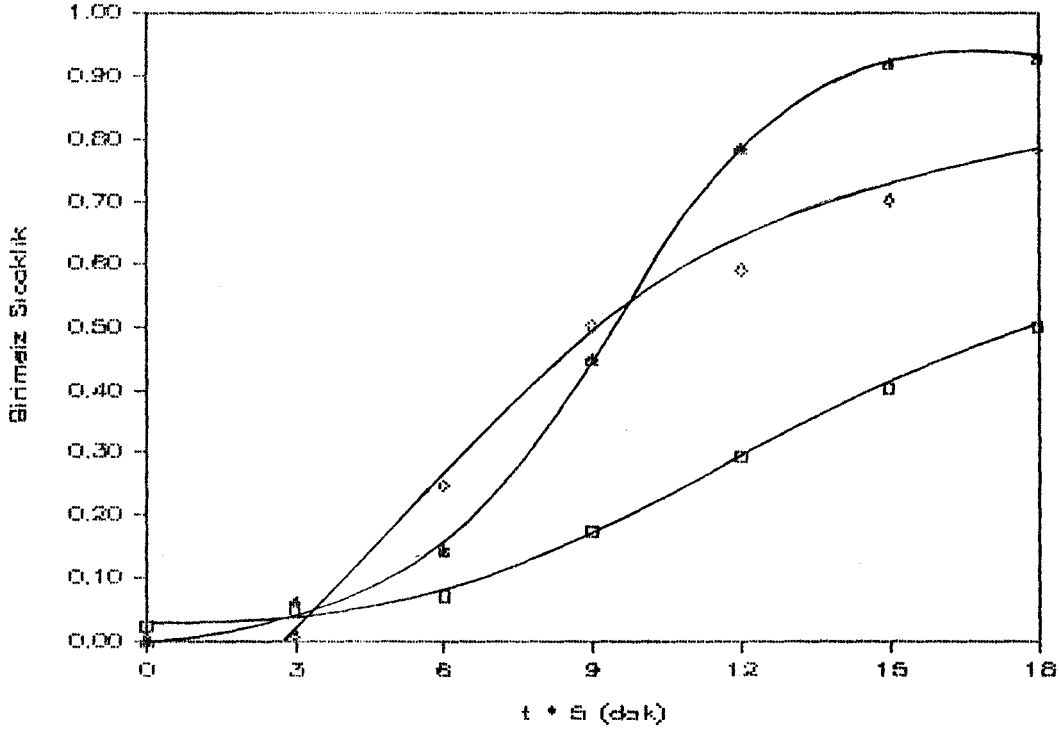
Şekil 17: Deney sonuçlarının Model I, Model II ve Model III ile karşılaştırılması. $Q = 9$, $TAL = 75^{\circ}C$
 $X = 0.035$ m

□ deney + model I ◇ model III Δ model II



Şekil 18: Deney sonuçlarının Model I, Model II ve Model III ile karşılaştırılması. $Q = 9$, $TAL = 75^{\circ}C$
 $x = 0.335$ m

□ deney + model I ◇ model III △ model II



Şekil 19: Deney sonuçlarının Model I, Model II ve Model III ile karşılaştırılması. $Q = 9$, $TAL = 75^\circ C$
 $x = 0.53$ m

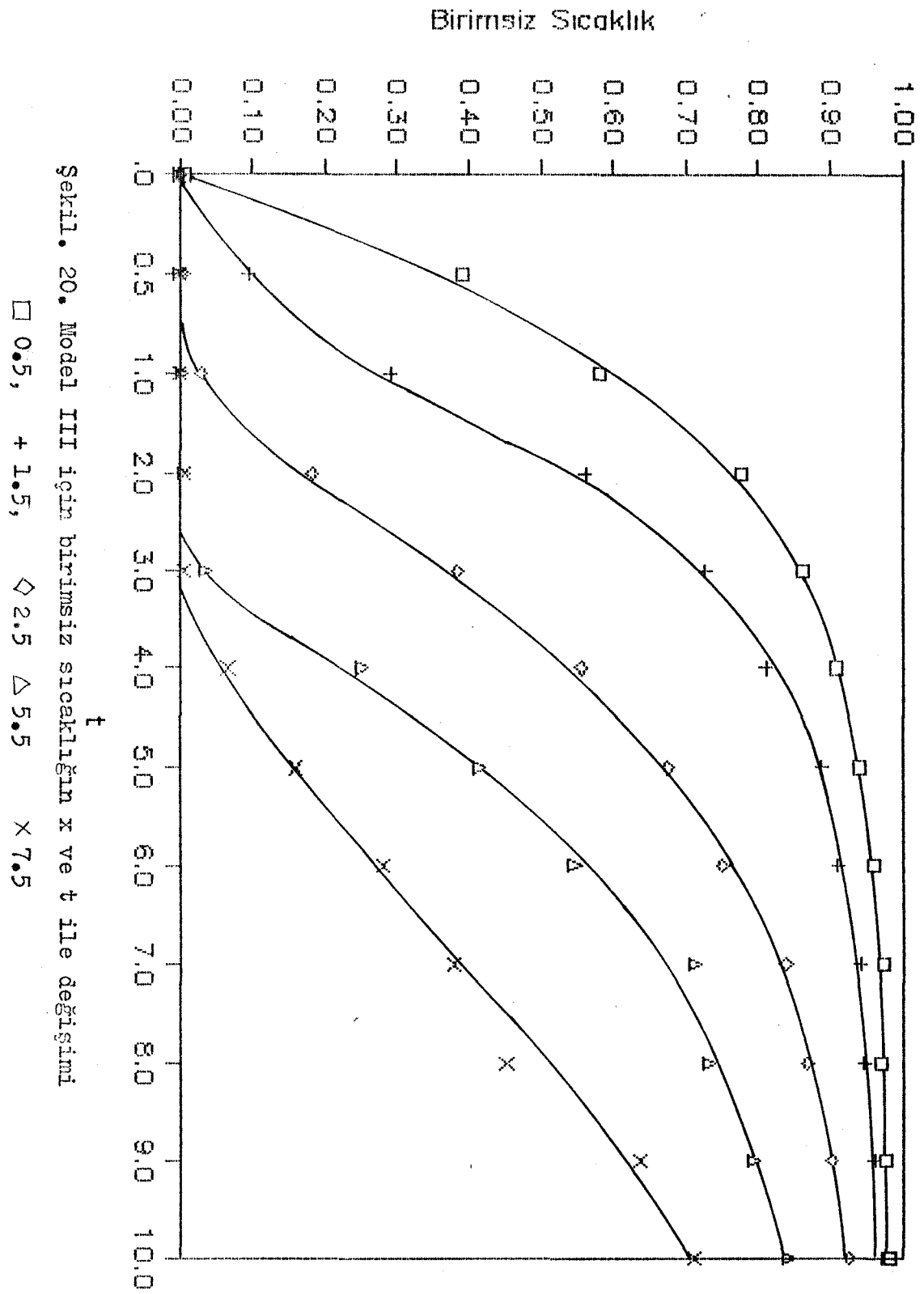
□ deney + model I ◇ model III Δ model II

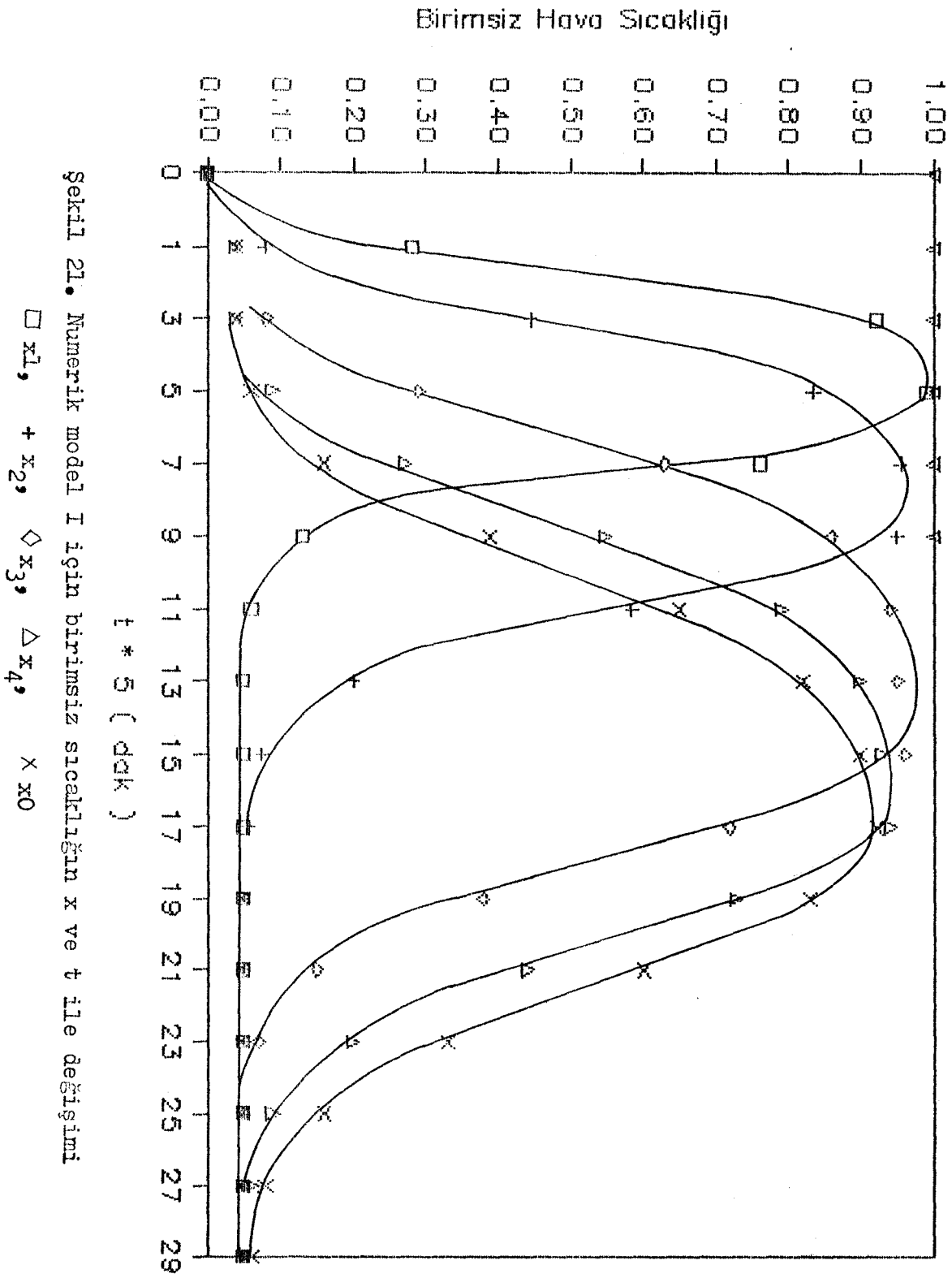
18 'de $x = 0.335$ m 'deki her üç model ve deneysel sonuçlar için sıcaklık dağılımları gösterilmiştir. Bu uzaklıklarda deneysel sonuçlarla teorik sonuçlar arasında fazla fark olmadığı görülmektedir. Şekil 19 'da ise modeller ve deneysel sonuçlar için depo çıkışındaki sıcaklık dağılımları verilmiştir. Bu dağılımlar arasında fark olduğu görülmektedir. Bunun nedeni teorik modellerde hesaba katılmayan, fakat gerçekte depo çıkışında meydana gelen "end effect" in deney sonuçlarına yansımalarıdır.

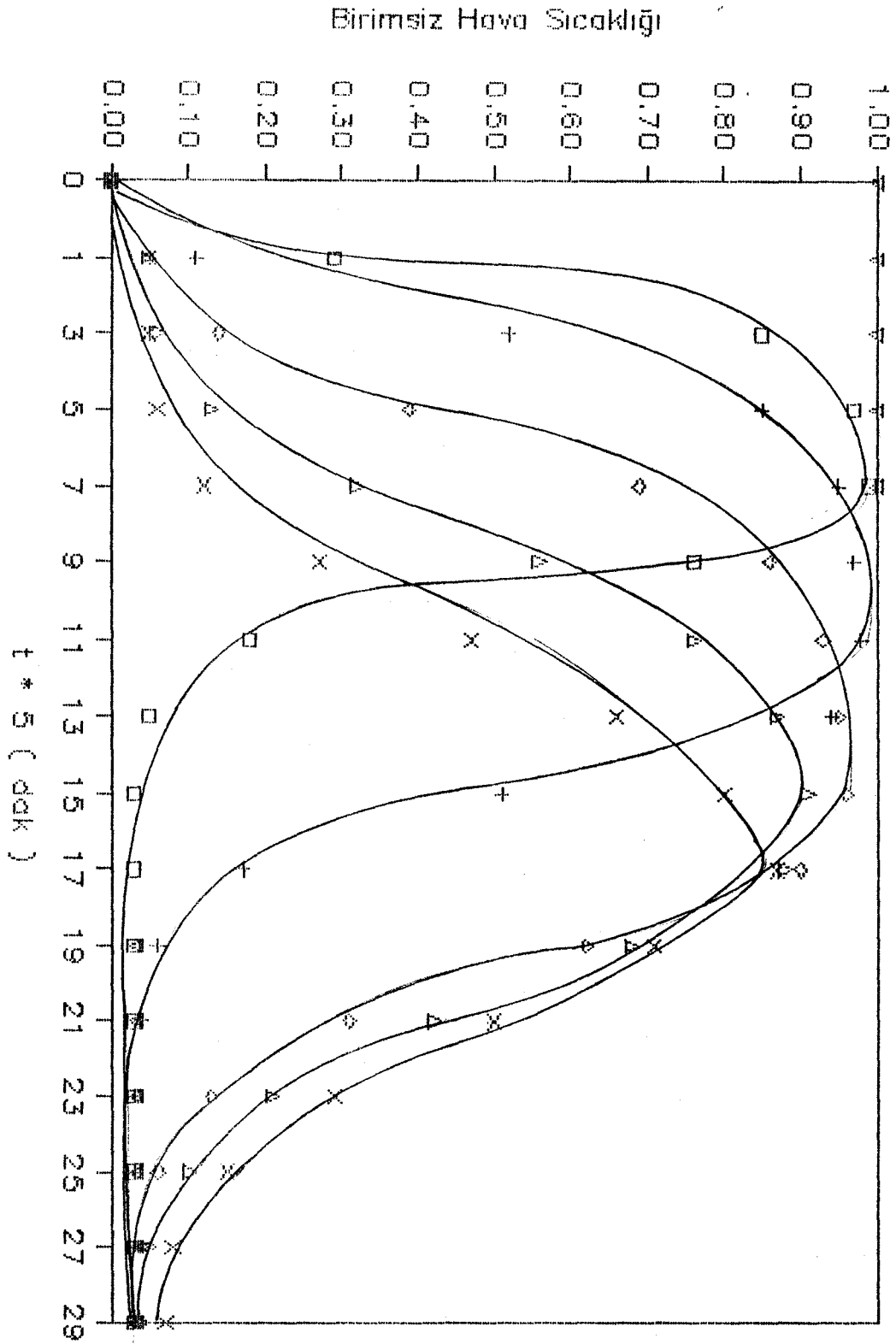
Modellerden elde edilen sonuçlar Şekil (20-25) 'de verilmiştir. Şekil 20 'de analitik modelden elde edilen birimsiz sıcaklığın birimsiz uzaklık x ve birimsiz uzaklık t ile olan ilişkisi gösterilmektedir.

Model I , II ve III deney sonuçlarıyla karşılaştırılırken birbirleriyle de karşılaştırılırlar (Şekil 17-19). Bu şekillerde görüleceği gibi, Model I ve Model II 'den elde edilen sonuçlar birbirine yakındır. Bu da iletkenliğin etkisinin önemsiz olduğunu gösterir. Deney sırasında kullanılan deponun çapının küçük olması iletkenliğin etkisini azaltmıştır. Daha büyük skalalı bir depoda iletkenlik daha etkin olabilir. Ancak Farber ve Coutier (1982) yaptıkları araştırmalarında büyük skalalı sistemler için de iletkenliğin etkisinin önemsiz olduğunu söylemişlerdir.

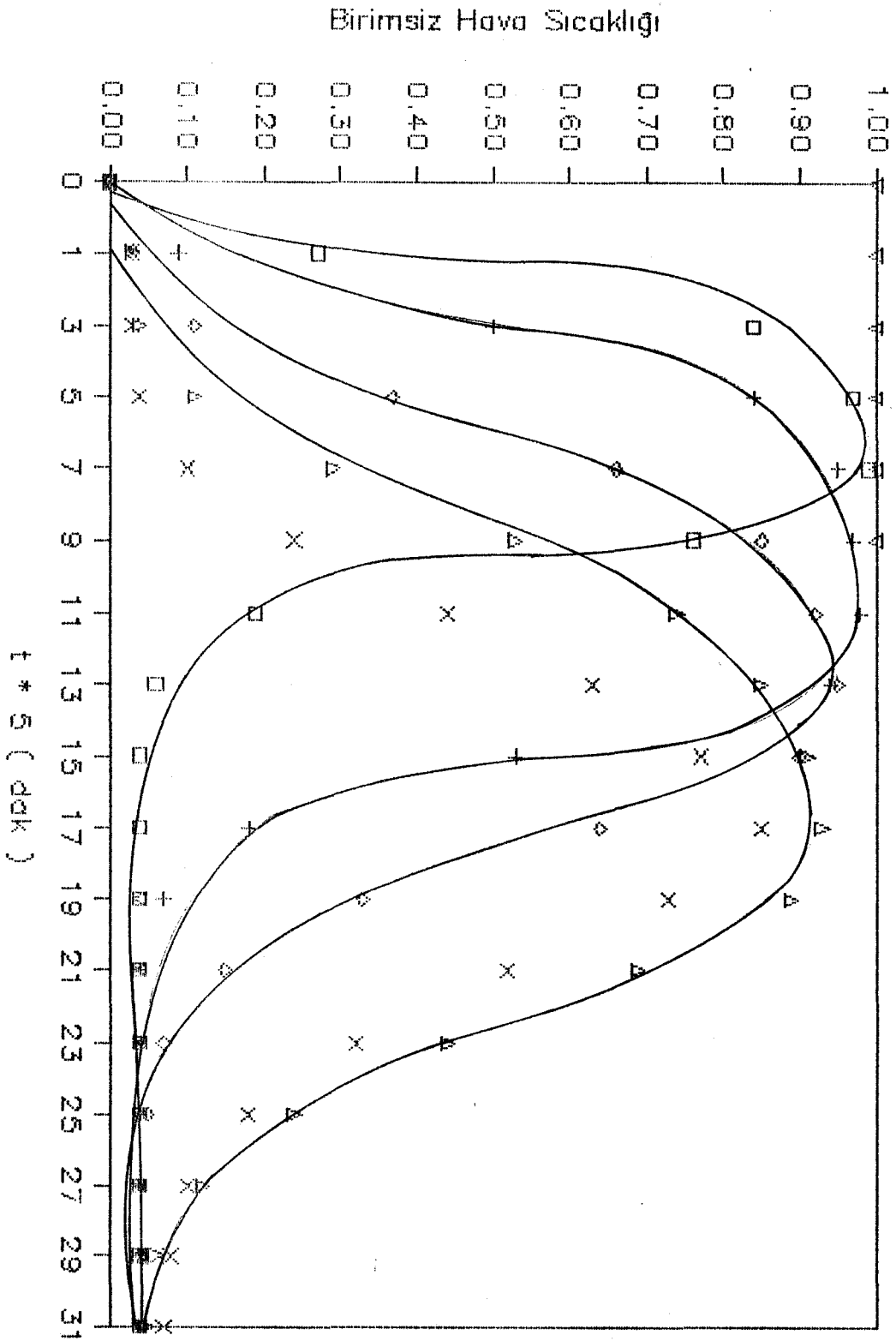
Şekil (21-25) 'de Model I 'den elde edilen sonuçlar değişik işletme şartları için gösterilmiştir. Bu şekillerde her eğri depo boyunca belli bir x noktasındaki sıcaklık dağılımını göstermektedir. Sıcaklık kayıpları olmasaydı, her eğrinin altındaki alan birbirine eşit olacaktı. Fakat kayıplar olduğundan eşitlik sağlanamaz. Eğrilerin maksimum noktalarına ulaşma süreleri deney sonuna doğru artmaktadır. Bunun nedeni giriş bölgesinde, sıcaklık gradienti fazla olduğundan ısı transferi de fazla olur. Böylece girişte maksimum sıcaklığa daha çabuk ulaşılır. Model I için







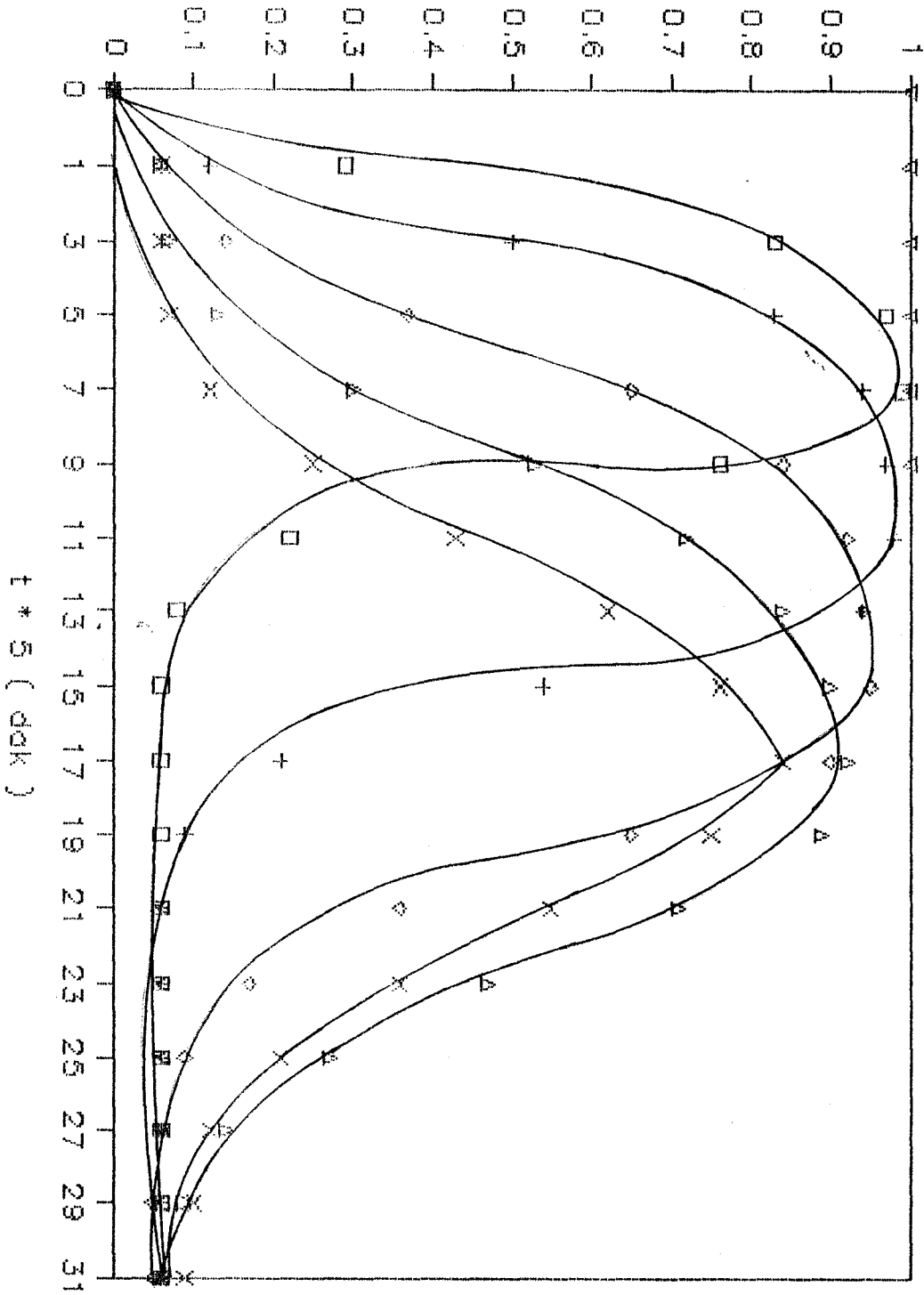
Şekil 22. Numerik model I için birimsiz sıcaklığın x ve t ile değişimi



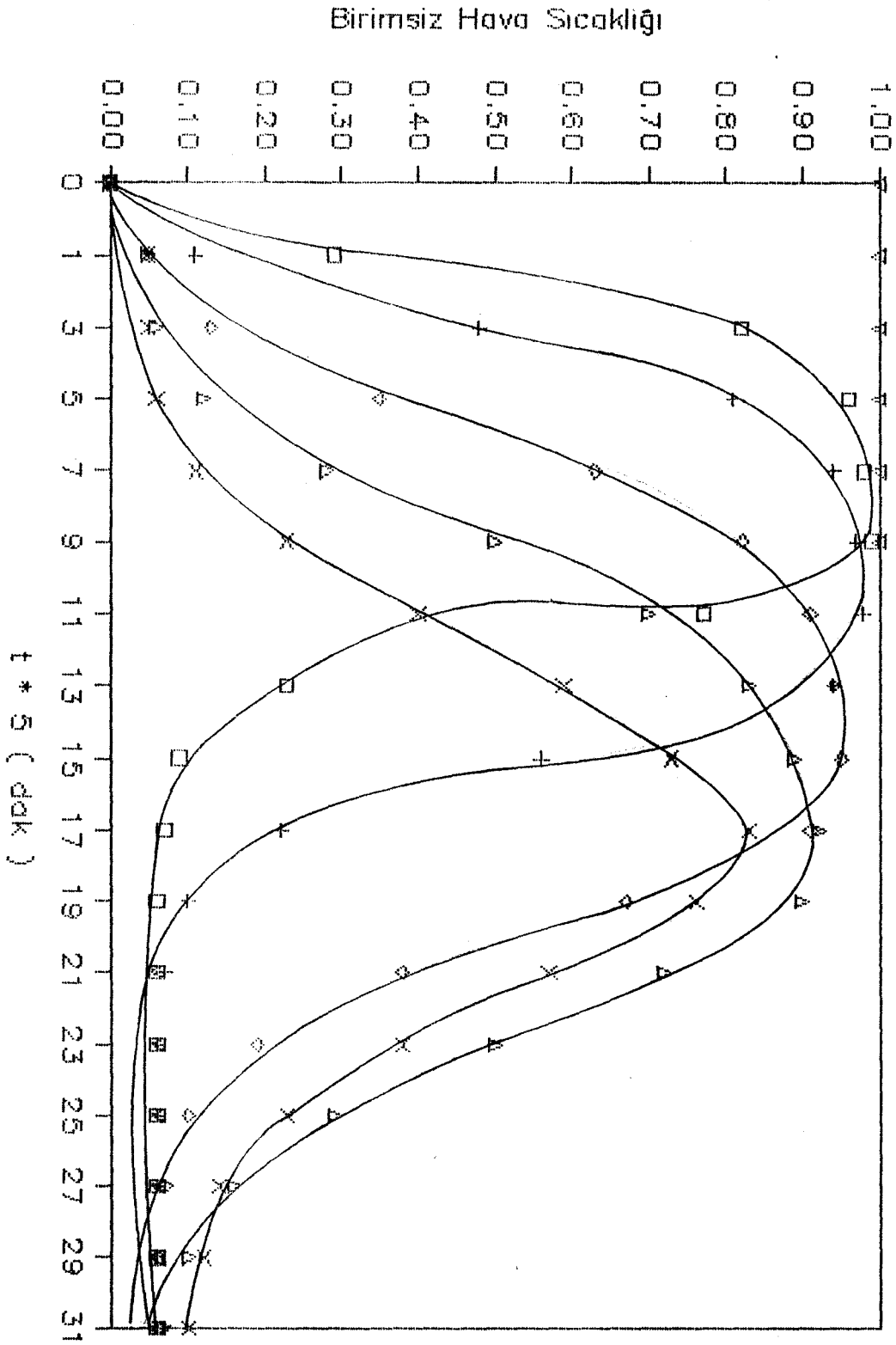
Şekil 23. Numerik model I için birimsiz sıcaklığın x ve t ile değişimi

□ x_1 , + x_2 , ◇ x_3 , △ x_4 , X x_0

Birimsiz Hava Sıcaklığı

Şekil 24. Numerik model I için birimsiz sıcaklığın x ve t ile değişimi

$\square x_1$, $+ x_2$, $\diamond x_3$, Δx_4 , $\times x_0$



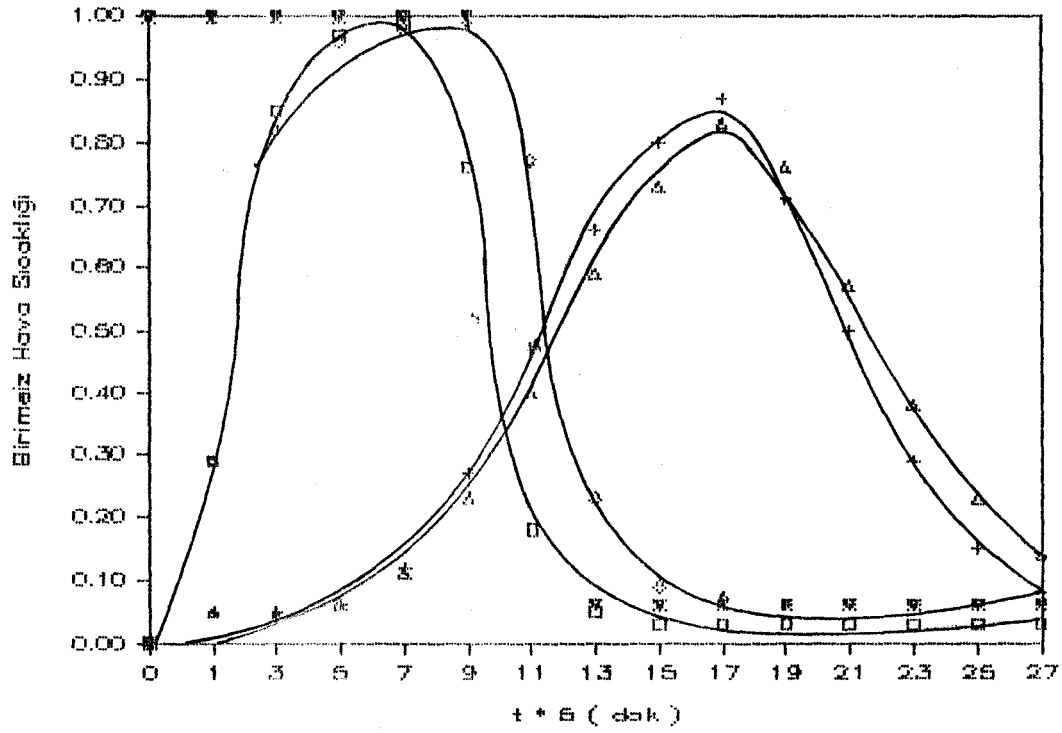
Şekil 25. Numerik model I için birimsiz sıcaklığın x ve t ile değişimi

$\square$ x_1 , $+$ x_2 , $\diamond$ x_3 , $\triangle$ x_4 , $\times$ x_0

hesaplamalar yapılırken bazı kabuller yapılmıştır. Havanın ve dolgunun fiziksel özellikleri (γ , C_p , k) işletme şartlarında sabit olarak alınmıştır. Depolama ve geri kazanma işlemleri sırasında hava giriş sıcaklıkları ve deponun başlangıç sıcaklıkları sabit tutulmuştur. İşletme sıcaklıkları çok yüksek olmadığından (75-45°C) radyasyonla olan ısı transferi ihmal edilmiştir. Isı kayıpları hesaplanırken cam yününün kalınlığının her yerde eşit olduğu kabul edilmiş ve ısı iletkenliği olarak 0.035 W/m°C değeri alınmıştır (Perry ve Chilton, 1971). Ayrıca dış yüzey sıcaklığının ortam sıcaklığına eşit olduğu da kabul edilmiştir. Hesaplamalar sırasında alanın logaritmik ortalaması kullanılmıştır. Bu değer 0.0131 m² olarak hesaplanmıştır.

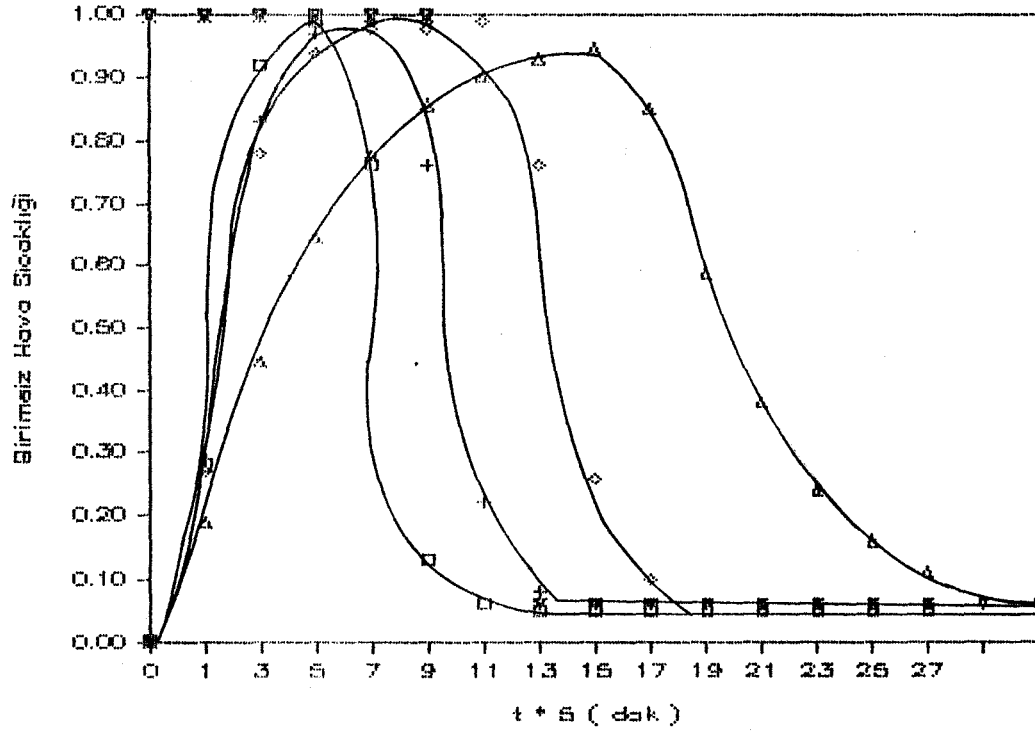
İşletme şartlarının Model I ' den elde edilen sonuçlar üzerindeki etkisi Şekil (26,27) 'de gösterilmiştir. Şekil 26 'da hava giriş sıcaklığının etkisi incelenmiştir. $Q = 7$, TAL 75 ve 45°C 'leri için iki ayrı x noktalarında (0.291, 0.485 m) sıcaklık dağılımları çıkarılmıştır. Depolama işlemi sırasında sıcaklıklar birbirine yakındır. Fakat geri kazanma işlemi sırasında TAL = 45°C sıcaklık değerlerinin daha yüksek olduğu görülür. Depolama sırasında giriş sıcaklığının sonuçlar üzerinde fazla etkisi olmadığı görülmektedir.

Şekil 27 ise hava akım hızının Model I sonuçları üzerindeki etkisini göstermektedir. Burada TAL = 55°C 'de 113.45 ve 33.64 lit/dak hava akım hızlarında iki x noktasındaki (0.093, 0.189) sıcaklık dağılımları verilmiştir. Hava akım hızındaki düşüş, sıcaklıklarda da belirgin bir düşmeye neden olmaktadır. Bu durum deney sonuçlarında da elde edilmişti. Hava akım hızının hacimsel ısı transfer katsayısını dolayısıyla ısı transferini doğrudan etkilemesi bunun nedenidir.



Şekil 26: Hava giriş sıcaklığının numerik model I sonuçları üzerindeki etkisi. $Q = 7$, $TAL = 75$, 45°C
 $x = 0.291$, 0.485 m

□ 75°C + 75°C ◇ 45°C △ 45°C X $x = 0.0$



Şekil 27: Hava akım hızının numerik model I sonuçları
üzerindeki etkisi. TAL = 55°C, Q = 9, 3

$\square$ 0.093 m (Q=9) $+$ 0.189 m (Q=9)
 $\diamond$ 0.093 m (Q=3) $\triangle$ 0.189 m (Q=3) X x 0

Isı deposunda sıcaklık tabakaları meydana gelir. Bu durum deneysel sonuçlarda (Şekil 3-11) ve teorik sonuçlarda (Şekil 20-25) gözlenmiştir. Depolama sırasında depo boyunca yükseldikçe elde edilen sıcaklık değerleri azalmaktadır. Deponun en altında en yüksek, çıkışta ise en düşük sıcaklık tabakası meydana gelir. Geri kazanma işlemi sırasında soğuk hava depoya üstten girerse, en sıcak tabakanın olduğu yerden çıkacaktır. Böylece elde edilebilecek en yüksek sıcaklıktaki hava elde edilmiş olur. Fakat yapılan deneyler sırasında geri kazanma için soğuk hava deponun altından girmiştir. Bu yüzden tabakalaşmanın fazla bir etkisi olmamıştır.

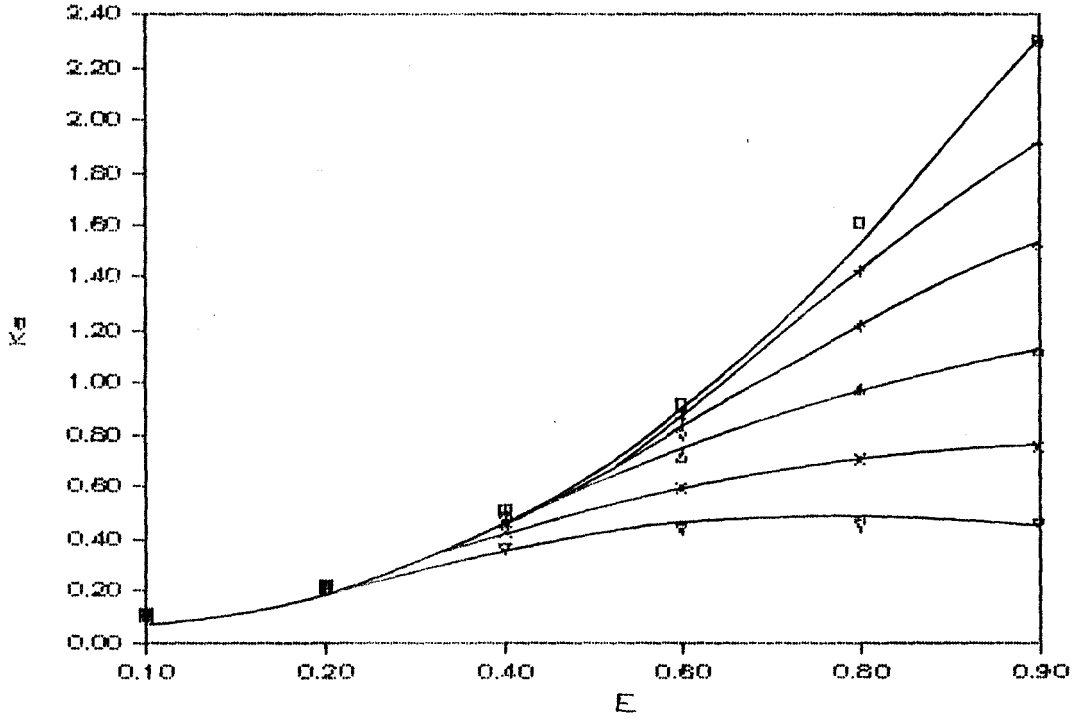
Tabakalaşmanın depo performansı üzerindeki etkisini görebilmek için tabakalaşma katsayısı, K_s hesaplanmıştır. K_s gerçekte elde edilen enerjinin depo sıcaklığı sabit olduğu zaman elde edilecek enerjiye olan oranı olarak daha önce de belirtilmişti. Tabakalaşma katsayısı bir sistem sabitidir ve (Eşitlik 31) 'den deneme yanılma metoduyla hesaplanabilir.

$$\frac{\ln (1 / (1-E))}{(1 + M \ln (1 / (1-E))) E} = K_s \quad (31)$$

Bu hesaplamanın sonuçları Şekil 28 'de gösterilmiştir. E toplacın ısı değiştirme etkinliği, M ise karıştırma sayısıdır (Eşitlik 27 ve 28). Tipik bir güneş enerjisi sisteminde E , 0.4 olarak hesaplanabilir. Kum dolgu için M değeri ise 0.102 olarak hesaplanmıştır. Bu değerlere karşılık Şekil 28 'den K_s için yaklaşık 1.20 değeri bulunur. Bunun anlamı, sabit depo sıcaklığına sahip bir sisteme oranla, bu sistemin % 20 daha iyi performans göstereceğidir.

Büyük skalalı ısı deposu tasarımı için daha önce önerilen metod uygulaması aşağıdaki gibidir:

1. Dolgu hacminin belirlenmesi:



Şekil 28: Tabakalaşma katsayısı

$\square M = 0.00$ $+ M = 0.10$ $\diamond M = 0.25$
 $\triangle M = 0.50$ $\times M = 1.00$ $\nabla M = 2.00$

$$V = A L = \frac{n Q_s}{f_d C_d (1 - \epsilon) (\Delta T) d} \quad (35)$$

Bu eşitliğe kum için değerler yerleştirilirse, şu şekli alır.

$$V = A L = \frac{n Q_s}{0.271 (\Delta T) d}$$

Gainesville Florida 'da bir günlük faydalı enerji , Q_c 125 kWh olarak verilmiştir (Farber ve Coutier,1982). Depolama verimi olarak 0.90 seçilir.

$$Q_s = \eta_s * Q_c = 0.90 * 125 = 112.5 \text{ kWh}$$

$(\Delta T)d$ için ise 30°C seçilir.

$$V = A L = \frac{n * Q_s}{0.271 * (\Delta T) d} = \frac{1 * 112.5}{0.271 * 30} = 13.84 \text{ m}^3$$

2. G , D_p çifti seçimi :

$$D_p = 0.02 \text{ m} \quad G = 0.12 \text{ kg/m}^2\text{-s}$$

$$h_v = 652 (G/D_p)^{0.7} = 652 (0.12/0.02)^{0.7} = 2285.4 \text{ W/m}^2\text{-}^\circ\text{C}$$

3. Optimal yatak uzunluğunun belirlenmesi :

$$\alpha = \frac{h_v}{G C_a} = \frac{2285.4}{0.12 * 1012} = 18.82 \text{ m}^{-1}$$

$$\beta = \frac{h_v}{f_d C_d (1 - \epsilon)} = \frac{2285.4}{2300 * 800 * (1 - 0.47)} * 3600 = 8.44 \text{ saat}^{-1}$$

Bir günlük çalışma süresi, $t_c = 6$ saat

$$\alpha L = \beta t_c$$

$$L = \frac{\beta t_c}{\alpha} = \frac{8.44 * 6}{18.82} = 2.69 \text{ m}$$

4. A yüzeyinin hesaplanması :

$$A = \frac{V}{L} = \frac{13.84}{2.69} = 5.14 \text{ m}^2$$

Günde 112.5 kWh enerji depolayabilecek , dolgu maddesi kum olan bir ısı deposunun yüksekliği, L , 2.69 m, yüzey alanı, A , 5.14 m² olarak hesaplanmıştır.

5. SONUÇLAR

Bu çalışmada, güneş enerjisi sistemlerinde kullanılan bir dolgulu yatak ısı deposu üzerinde deneyler yapılmıştır. Dolgu maddesi olarak yaklaşık 0.02 m karakteristik çaplı tüpler içerisinde kum kullanılmıştır.

Değişik işletme şartlarında sıcaklık eğrileri çıkarılmıştır. Hava giriş sıcaklığından çok hava akım hızının sıcaklık dağılımları üzerinde etkisi olduğu görülmüştür.

Depo performansını belirlemek için verim hesabı yapılmıştır. Hava giriş sıcaklığı 75°C ve hava akım hızı 113.45 lit/dak olduğunda, depolama verimi 0.81 olarak hesaplanmıştır. Aynı giriş sıcaklığında ve hava akım hızı 35.69 lit/dak olduğunda verim 0.45 değerine düşmüştür.

Yatak boyunca basınç düşmesi, 0.04 – 0.12 kg/dak hava akım hızları arasında, 0.75 – 2.41 N/m² arasındadır. Basınç değerleri düşük olduğundan kompresör için gerekli enerji ihmal edilebilir.

DeneySEL sonuçlar iki numerik, bir de analitik çözümden elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. DeneySEL sonuçlarla teorik sonuçların uyum içinde oldukları gözlenmiştir. Numerik Çözüm 1 (Model I) uygulaması kolay ve basit olduğu için dolgulu yatakta ısı deposu ön tasarımı için önerilebilir.

Kum için tabakalaşma katsayısı, Ks 1.20 olarak hesaplanmıştır. Bunun anlamı sabit depo sıcaklığında çalışan bir sisteme oranla, ısı tabakalaşmasının olduğu bu sistemin % 20 daha iyi performans göstericidir.

Numerik model I 'den elde edilen sonuçlara dayanarak büyük skalalı bir deponun boyutları çıkarılmıştır. Günde 112.5 kWh enerji depolayabilecek, dolgu maddesi 2 cm karakteristik çaplı tüpler içindeki kum olan ısı deposunun yüksekliği 2.69 m, yüzey alanı 5.14 m² hesaplanmıştır.

ÖZET

Güneş enerjisi, temiz ve sınırsız olması bakımından büyüyen enerji sorununa karşı bir alternatif kaynak oluşturmaktadır. Bu enerjiden verimli bir şekilde yararlanabilmek için ısı depolaması gereklidir. Isı depolaması duyarlı ısı, ergime ısısı, tepkime ısısı veya bunların bileşimi şeklinde yapılır.

Bu çalışmada, güneş enerjisi sisteminde çok kullanılan dolgulu yataкта duyarlı ısı tekniği ile ısı depolaması incelenmiştir. Deneyler, 0.105 m çapında, 0.53 m yüksekliğinde ve 0.05 m cam yünüyle yalıtılmış ısı deposu üzerinde yapılmıştır. Dolgu maddesi olarak yaklaşık 0.02 m karakteristik çaplı tüpler içerisinde kum kullanılmıştır. Deneyler sırasında depo sıcaklıkları bakır-konstantan ısı çiftleriyle, hava sıcaklıkları termometrelerle ve hava akım hızı rotametreyle ölçülmüştür. Değişik işletme şartlarında depolama ve geri kazanma işlemleri için sıcaklık dağılımları elde edilmiştir. İşletme şartlarının sonuçlar üzerindeki etkisi incelenmiştir. Hava akım hızının sonuçlar üzerinde büyük etkisi olduğu görülmüştür.

Deney sonuçları teorik modellerden elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Model I ve II numerik, Model III ise analitik yaklaşımlardır. Deney sonuçlarının teorik uyum içinde olduğu, yalnız depo çıkışında sapmalar olduğu görülmüştür.

Kum için tabakalaşma katsayısı 1.20 olarak hesaplanmıştır. Bunun anlamının sabit sıcaklıkta çalışan bir depoya oranla ısı tabakalaşmasının meydana geldiği deponun performansının % 20 daha iyi olduğu belirtilmiştir.

Depo performansını belirlemek için depolama verimi hesaplanmıştır.

Depolama veriminin işletme şartlarıyla olan ilişkisi gösterilmiş, hava akım hızı arttıkça depolama veriminin arttığı belirlenmiştir.

Yatakta meydana gelen basınç düşmeşi hesaplanmıştır. Elde edilen basınç değerlerinin düşük olmaları kompresör için gerekli enerji miktarının fazla olmadığını göstermiştir.

Daha büyük skalalı bir ısı deposu tasarımı için bir metod verilmiştir. Bu metodda Numerik Model I 'den elde edilen sonuçlar kullanılmaktadır. Hesaplamalar sonucunda 2 cm karakteristik çaplı tüpler içinde kumun dolgu maddesi olarak kullanıldığı bir ısı deposunun, büyük skala için yüksekliği ve yüzey alanı hesaplanmıştır.

Güneş enerjisinde uygulanabilecek bir ısı deposunun ön tasarımı için Numerik Model I, uygulaması kolay ve basit olması bakımından önerilebilir.

SUMMARY

Energy from the sun being clean and abundant - has become a feasible source of energy for our growing energy demand. In order to exploit this energy, we have to store the heat. Heat storage can be done in a number of ways: in the form of sensible heat, latent heat, heat of reaction, or any combination of these.

In this work, we study heat storage with the sensible heat technique in packed beds.

Tests were performed in storage tanks measuring 0.105 m in diameter, 0.53 m in height with 0.05 m of glass wool insulation. Sand in tubes of 0.02 m equivalent diameter was used as the packing material. During the tests, bed temperatures were measured with copper-constantan thermocouples, air temperatures were measured by thermometers, and the air flow rates were measured using a rotameter. Under various operating conditions, temperature profiles were measured for both storage and recovery. The effects of the operating conditions on the test results were studied. It was observed that the air flow rate had a profound effect on the test results.

The results of theoretical models were compared with the test results. Model I and II are numeric ones and model III is the analytical approach. Overall, test results were in good agreement with the theoretical results; some variations occurred at the bed exits.

For sand, the stratification coefficient was calculated as 1.2. This means that a bed where heat stratification takes place performs 20 % better than a bed operating at constant temperature.

In order to determine performance of the storage unit, storage efficiencies were calculated. The relationship of storage efficiency

improved as air flow rates were increased.

The pressure drops in the packed bed were calculated. The observed low pressure drops meant that the required energy for the compressor can be negligible.

A method for designing larger scale storage tanks was given. In this method the results of the numeric model I were used. From the calculations the height and the face area for a large scale heat tank, where sand in 0.02 m equivalent diameter tubes is the packing material, was computed.

The numerical model I is recommended for the preliminary design of packed bed heat storage systems.

SEMBOLLER LİSTESİ

A	yatak kesit alanı (m^2)
Alm	logaritmik ortalamalı alan (m^2)
ap	dolgu alanının depo hacmine oranı
Cp,a	havanın ısı kapasitesi ($J/kg^\circ C$)
Cd	dolgunun ısı kapasitesi ($J/kg^\circ C$)
Dp	dolgunun karakteristik çapı (m)
E	toplacın ısı değiştirme etkinliği
G	havanın birim alandaki kütle akım hızı (kg/m^2-s)
heq	model 3 için hesaplanan eşdeğer ısı transfer katsayısı ($W/m^3^\circ C$)
hv	hacimsel ısı transfer katsayısı ($W/m^3^\circ C$)
kd	dolgunun ısı iletkenliği ($W/m^\circ C$)
keq	model 3 için hesaplanan eşdeğer dolgu iletkenliği ($W/m^\circ C$)
Ks	tabakalaşma katsayısı
M	kariştirme sayısı
$\dot{m}$	hava kütle akım hızı (kg/s)
Mk	yatak için iletkenlik sayısı
n	gün (ya da saat) sayısı
Ns	transfer birimleri sayısı
ΔP	basınç düşmesi (N/m^2)
Qc	faydalı enerji miktarı (kWh)
QL	toplam ısı kaybı (W)
Qs	depolanan enerji miktarı
t	zaman (s)
Ta	hava sıcaklığı ($^\circ C$)
tc	deponun çalışma süresi (saat)
T(x,t)	model 3 için birimsiz sıcaklık

T_d	depo sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)
ΔT_d	ortalama depo sıcaklığı ile ortam sıcaklık farkı ($^{\circ}\text{C}$)
T_{AL}	depolama sırasında havanın giriş sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)
T_{AT}	ortam sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)
T_{BA}	birimsiz hava sıcaklığı
T_{BD}	birimsiz depo sıcaklığı
UL	toplam kayıp katsayısı ($\text{W/m}^3\text{-}^{\circ}\text{C}$)
V	deponun hacmi (m^3)
v_a	hava akım hızı (m/s)
Y	birimsiz uzaklık
Z	birimsiz zaman
η_s	depolama verimi
ρ_a	havanın yoğunluğu (kg/m^3)
ρ_d	dolgunun yoğunluğu (kg/m^3)
μ_a	havanın viskozitesi (lb/ft-hr)
ϵ	boşluk oranı
ξ	model 3 için uzunluk (m)
λ	model 3 için karakteristik uzunluk
τ	model 3 için zaman (s)
θ	model 3 için karakteristik zaman

KAYNAKLAR

- ALANIS, E., SARAVIA, L., ROVETTA, L., 1977. Measurement of rock pile heat transfer coefficients. Solar Energy, Vol. 19, 571-572
- CHANDRA, P., WILLITS, D.H., 1981. Pressure drop and heat transfer characteristics of air-rockbed thermal storage systems. Solar Energy, Vol. 27, No. 6, 547-553
- DUNKLE, R.V., EFFUL, W.M.J., 1972. Randomly packed particulate bed regenerator and evaporation coolers. Mech. Chem. Engng. Trans. Inst. Engng., Australia, MCB(2), 117-121
- FARBER, E.A., COURTIER, J.P., 1982. Two applications of a numerical approach of heat transfer process within packed beds. Solar Energy, Vol. 29, No. 6, 451-462
- HODGMAN, C.D., SELBY, S.M., WEAST, R.C., 1961. Standard Mathematical Tables. Chem. Rubber Pub. Co., Ohio
- HOLLANDS, J., CHINNECK, D., CHANDRASHEKAR, A., 1979. Collector and storage efficiencies in solar heating systems. Solar Energy, Vol. 23
- HUGHES, P.J., KLEIN, S.A., CLOSE, D.J., 1976. Packed bed thermal storage models for air heating and cooling systems. Transactions of ASME, May, 336-337
- LOF, G.O.G., HAWLEY, R.W., 1940. Unsteady state heat transfer between air and loose solids. Ind. Engng. Chem. 40, 1061
- MANCINI, N.A., 1983. Thermal storage systems and analytical models. Conference on Non-conventional Energy Sources and Summer Workshop On the Physics of Non-conventional energy sources

- PERRY, R.H., CHILTON, C.H., 1972. Chemical Engineers' Handbook, Fifth Ed., McGraw Hill
- PHILLIPS, W.F., 1981. The effects of stratification on the performance of solar air heating systems. Solar Energy, Vol. 26, 175-180
- RIAZ, M., 1977. Analytical solutions for single and two-phase models of packed bed thermal storage systems. Journal of Heat Transfer, Vol. 99, August, 489-492
- SAEZ, E.A., MCCOY, B.J., 1982. Dynamic response of a packed bed thermal storage system - A model for solar air heating. Solar Energy, Vol. 29, No. 3, 49-54
- SCHUMANN, T.E.W., 1929. A liquid flowing through a porous prism. J. Franklin Instit., 208, 405-416
- VORTMEYER, D., SCHAEFFER, R.J., 1974. Equivalence of one and two phase models for heat transfer processes in packed beds : One Dimensional Theory. Chem. Engng. Science, Vol. 29, 485-491
- WAKAO, N., KAGUEI, S., FUNAZKRI, T., 1979. Effect of fluid dispersion coefficients on particle to fluid heat transfer coefficients in packed beds. Chem. Engng. Science, Vol. 34, 325-336
- WYMAN, C., CASTLE, J., KREITH, F., 1980. A review of collector and storage technology for intermediate temperature applications. Solar Energy, Vol. 24, 517-540

TEŞEKKÜR

Bana bu konuda tez yapma olanağını sağlayan ve çalışmalarımı yönlendiren değerli hocam Y. Doç. Dr. Yaşar Demirel 'e teşekkür borçluyum.

Bilgisayar kullanımında ve programlamada gösterdiği yakın ilgi ve destek nedeniyle Sayın Zeki Yüzüak 'a teşekkürü bir borç bilirim.

Labrotuar çalışmalarında yardımlarından dolayı Ç.Ü. Fen Edebiyat Fakültesi Kimya Bölümü 1985 mezunlarından Demet Cekiç ve Mustafa Atilla 'ya teşekkür ederim.

Şekillerin çizilmesindeki yardımları nedeniyle teknik ressamlar Züleyha Budak ve Niyazi Zamir 'e de teşekkür etmek isterim.

ÖZGEÇMİŞ

1961 yılında Adana 'da doğdum. Orta ve lise öğrenimimi Üsküdar Amerikan Kız Lisesinde tamamladım. 1979 yılında Boğaziçi Üniversitesi Kimya Mühendisliği bölümüne girdim. 1983 yılında buradan mezun oldum.

1984 bahar döneminde yüksek lisans öğrenimi yapmak için Ç.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsüne kaydoldum. Halen kimya anabilim dalında yüksek lisans programının son aşaması olan bu tezimi hazırlamış bulunmaktayım.

E K 1

Tarih :	15-12-1980	A. Alın Hızı :	9	O. Rüzgar Hızı :	-
Ortam Sıcaklığı :	12,5°C	A. Giriş Sıcaklığı :	12,5°C	Toplam Zaman :	120 dk
Ortam Nemi :	-	A. Başlangıç Zamanı :	12.07	Deney No :	19

Thermometre

[illegible]

GERİ KAZANMA

Tarih 15-11-84	A. Alın Hızı : 3	O. Rüzgar Hızı :
Ortam Sıcaklığı : 15°C	A. Giriş Sıcaklığı : 17°C	Toplam Zaman : 105 dak
Ortam Nemi :	A. Başlangıç Zamanı : 12:35	Deney No : 3

Thermometre Thermocouples

[illegible]

Thermometre

[illegible]

Ortam Sıcaklığı : 15 °C	A.Giriş Sıcaklığı : 75	Toplam Zaman : 135 dk
Ortam Nemi : -	A.Başlangıç Zamanı : 1345	Doney No : 12

thermometre

[illegible]

Tarih 30-11-84:	A. Akım Hızı : 7	O. Rüzgar Hızı :
Ortam Sıcaklığı : 15.5°C	A. Giriş Sıcaklığı : 65°C	Toplam Zaman : 150 dak
Ortam Nemi :	A. Başlangıç Zamanı : 13:35	Deney No : 14

Thermometre Thermocouples

[illegible]

Termometre

[illegible]

Termometre

[illegible]

Thermometre

[illegible]

GERİ KAZANMA

Tarih 6-11-84:	A.Alın Hızı : 7	O.Rüzgar Hızı : -
Ortam Sıcaklığı : 18.5°C	A.Giriş Sıcaklığı: 21%	Toplam Zaman : 150 dak
Ortam Nemi :	A.Başlangıç Zamanı: 13:45	Deney No : 4

Thermometre Thermocouples:

[illegible]

Tarih 1-12-84 :	A. Akım Hızı : 5	O. Rüzgar Hızı :
Ortam Sıcaklığı : 14.5°C	A. Giriş Sıcaklığı : 25°C	Toplam Zaman : 255 dak
Ortam Nemi :	A. Başlangıç Zamanı : 9:30	Deney No : 15

ermometre Thermocouples

8.5cm	28.5cm	40.5cm	0.0	37cm	49.5cm	48.5cm	53cm	Δt
1	2	3	4	5	6	7	8	15 dak
1.21	17.07	15.52	64.39	17.63	16.36	17.21	16.81	1
1.21	17.35	32.13	66.08	17.35	20.02	17.77	17.21	2
2.84	23.97	51.01	66.08	21.43	33.82	17.77	17.21	3
1.90	30.02	56.36	66.92	25.94	41.71	18.90	17.91	4
1.39	35.51	59.44	66.36	30.44	47.34	20.30	18.61	5
1.71	42.56	61.71	66.92	37.20	53.54	23.97	20.59	6
1.05	48.33	62.84	66.08	42.56	57.06	28.19	22.98	7
1.41	52.56	63.68	66.08	47.77	59.74	33.26	26.22	8
1.95	55.51	63.54	65.75	51.29	60.72	38.05	29.32	9
1.48	57.20	63.40	66.08	53.68	61.15	42.27	32.28	10
1.61	57.99	63.06	66.92	55.23	61.43	45.37	34.95	11
1.46	58.89	64.24	66.50	55.23	61.85	48.19	36.92	12
1.74	59.32	64.39	67.48	56.92	61.99	50.16	38.61	13
1.02	59.46	64.53	65.54	57.34	52.84	52.84	40.02	14
1.16	59.60	64.24	66.08	57.48	51.99	51.99	40.44	15
1.30	59.74	64.24	66.36	57.77	52.70	52.70	41.15	16
1.58	60.02	64.24	67.06	58.05	53.12	53.12	41.57	17

Tarih : 1.12.1984	A. Akım Hızı : 5	O. Rüzgar Hızı : -
Ortam Sıcaklığı : 14.5 °C	A. Giriş Sıcaklığı : 65.5	Toplam Zaman : 255 dk
Ortam Nemi : -	A. Başlangıç Zamanı : 9.30	Deney No : 15

Termometre

1	2	3	4	5	6	7	Tepiriş 8	AV
16	15	16	16	17			64	1
39.5	18.5	18	16	17			65.5	2
51	31.5	20	16.5	18.5			64.5	3
53.5	38	25	17.5	18			65.5	4
54.5	42	29	18.5	18.5			65.5	5
55.5	46.5	35	22	21			65.5	6
55.5	49.5	40	25.5	23			65	7
55.5	51	43.5	32	26			65	8
55.5	52	46	34	29.5			64.5	9
55.5	52	48	37.5	32.5			65.5	10
56	52.5	49	40.5	35			65.5	11
56	52.5	50	42.5	37			65.5	12
56	53	50.5	44	38.5			66	13
56	53	51	45.5	40			64.5	14
56	53	51	45.5	40.5			65	15
56	53.5	51	46.5	41			65.5	16
56.5	53.5	51.5	46.5	41.5			65.5	17

Docu. No. : 11

[illegible]

20-11-1988

A. Allen Hill

D: 5

0. Rüzgar Hızı : —

Ortam Sıcaklığı : 17 °C

A. Giriş Sıcaklığı: 55

Toplam Zaman : 180 dk

Ortam Nemi

A. Başlangıç Zamanı: 15.40

Deney No : 

Termometre

[illegible]

Tarih	: 22.12.78	A. Akım Hızı	: 3	O. Rüzgar Hızı	: —
Ortam Sıcaklığı	: 13.5 °C	A. Giriş Sıcaklığı	: 75	Toplam Zaman	: 180 dk.
Ortam Nemi	:	A. Başlangıç Zamanı	: 9.10	Deney No	: 21

Permometre

[illegible]

Tarih	: 18-12-1984	A. Alın Hızı	: 3	O. Rüzgar Hızı	: -
Ortam Sıcaklığı	: 15,5 °C	A. Giriş Sıcaklığı	: 65°	Toplam Zaman	: 180 dk
Ortam Nemi	:	A. Başlangıç Zamanı	: 13 40	Deney No	: 20

Thermometre Thermomètres

[illegible]

E K 2

D E N E Y No. 1

HV = 3969.241 W/M ² *°C	BI = 0.215
DX = 0.031 Mt. IM = 18.000	DT = 300.000 Sn. MT = 18.000
D = 0.105 Mt. U = 113.450 Lt/dk. H = 0.530	DP = 0.020 Mt.
TAT= 12.000°C. TAL= 75.000°C	TDO= 16.000°C. TAO= 14.000°C.

D E P O L A M A : No. 1

[illegible][illegible]

D E N E Y No. 2

=3885.515 W/M³*°C

BI = 0.211

= 0.031 Mt. MX = 18.000

DT = 300.000 Sn. MT = 18.000

= 0.105 Mt. V = 110.140 Lt/dk. H = 0.530 DP = 0.020 Mt.

T= 15.500°C. TAL= 65.000°C TDO= 15.500°C. TAO= 17.500°C.

[illegible][illegible]

[illegible][illegible]

D E N E Y No. 3

HV = 3805.181 W/M³*°C

BI = 0.206

DX = 0.031 Mt. MX = 18.000

DT = 300.000 Sn. MT = 18.000

D = 0.105 Mt. U = 106.990 Lt/dk. H = 0.530

DP = 0.020 Mt.

TAT= 17.500°C.

TAL= 55.000°C

TDO= 19.000°C.

TAO= 19.500°C.

[illegible][illegible]

D E N E Y No. 4

HV = 3719.790 W/M³*°C

BI = 0.202

DX = 0.031 Mt. HX = 18.000

DT = 300.000 Sn. MT = 18.000

D = 0.105 Mt. V = 103.670 Lt/dk. H = 0.530

DP = 0.020 Mt.

TAT= 13.500°C.

TAL= 45.000°C

TDO= 15.000°C.

TAO= 15.500°C.

D E N E Y No. 5

HV = 3270.015 W/M³*°C

BI = 0.177

DX = 0.029 Mt. MX = 19.000

DT = 300.000 Sn. MT = 18.000

D = 0.105 Mt. U = 86.680 Lt/dk. H = 0.530

DP = 0.020 Mt.

TAT= 15.000°C.

TAL= 75.000°C

TDO= 18.000°C.

TAO= 20.000°C.

[illegible][illegible]

[illegible][illegible][illegible][illegible]

D E N E Y No. 6

HV = 3236.267 W/M³*°C

BI = 0.175

DX = 0.029 Mt. MX = 19.000

DT = 300.000 Sn. MT = 18.000

D = 0.105 Mt. V = 85.440 Lt/dk. H = 0.530 DP = 0.020 Mt.

TAT= 18.000°C. TAL= 70.000°C TDO= 18.000°C. TAO= 20.000°C.

[illegible][illegible][illegible][illegible]

D E N E Y No. 7

HV = 3202.106 W/M ³ *°C		BI = 0.174	
DX = 0.029 Mt.	MX = 19.000	DT = 300.000 Sn.	MT = 18.000
D = 0.105 Mt.	V = 84.190 Lt/dk.	H = 0.530	DP = 0.020 Mt.
TAT= 15.500°C.	TAL= 65.000°C	TDO= 17.000°C.	TAO= 17.500°C.

[illegible][illegible]

D E N E Y No. 8

HV = 3133.632 W/M ³ *°C		BI = 0.170	
DX = 0.029 Mt. MX = 20.000		DT = 300.000 Sn. MT = 18.000	
D = 0.105 Mt. V = 81.700 Lt/dk. H = 0.530		DP = 0.020 Mt.	
TAT= 20.000°C.		TAL= 55.000°C	TDO= 22.000°C. TA0= 22.000°C.

[illegible][illegible]

D E N E Y No. 9

HV = 3064.572 W/M³*°C

BI = 0.166

DX = 0.028 Mt. IK = 20.000

DT = 300.000 Sn. MT = 18.000

D = 0.105 Mt. V = 79.210 Lt/dk. H = 0.530

DP = 0.020 Mt.

TAT = 13.500°C. TAL = 45.000°C

TDO = 15.000°C. TAO = 15.500°C.

[illegible][illegible][illegible][illegible]

D E N E Y No. 10

HV = 2794.384 W/H ³ °C		BI = 0.152	
DX = 0.027 Mt.	HX = 20.000	DT = 300.000 Sn.	MT = 18.000
D = 0.105 Mt.	V = 69.680 Lt/dk.	H = 0.530	DP = 0.020 Mt.
TAT= 17.500°C.	TAL= 55.000°C	TDO= 18.500°C.	TAD= 19.500°C.

[illegible][illegible]

D E N E Y No. 11

HV =2544.527 W/M^3*°C		BI = 0.138	
DX = 0.026 Mt. MX = 21.000		DT = 300.000 Sn. MT = 18.000	
D = 0.105 Mt. V = 61.180 Lt/dk. H = 0.530		DP = 0.020 Mt.	
TAT= 16.500°C. TAL= 75.000°C		TDO= 17.300°C. TAO= 18.500°C.	

[illegible][illegible]

D E N E Y No. 12

HV = 2491.608 W/M³*°C

BI = 0.135

DX = 0.026 Mt. IM = 21.000

DT = 300.000 Sn. MT = 18.000

D = 0.105 Mt. U = 59.420 Lt/dk. H = 0.530

DP = 0.020 Mt.

TAT = 14.500°C. TOL = 65.000°C

TDO = 17.000°C. TAO = 16.500°C.

[illegible][illegible][illegible][illegible]

D E N E Y No. 13

IV = 2438.552 W/M³*°C

BI = 0.132

XX = 0.026 Mt. MX = 21.000

DT = 300.000 Sn. MT = 18.000

Y = 0.105 Mt. V = 57.670 Lt/dk. H = 0.530 DP = 0.020 Mt.

AT = 17.000°C. TAL = 55.000°C TDO = 17.000°C. TAO = 19.000°C.

D E P O L A M A : No. 13

[illegible][illegible]

G E R I K A Z A N M A : No. 13

[illegible][illegible][illegible][illegible]

D E N E Y No. 14

HV = 1726.162 W/M²*°C

BI = 0.094

DX = 0.023 Mt. MX = 24.000

DT = 300.000 Sn. MT = 18.000

D = 0.105 Mt. U = 35.690 Lt/dk. H = 0.530

DP = 0.020 Mt.

TAT = 13.500°C. TAL = 75.000°C

TDO = 14.000°C. TAO = 15.500°C.

D E P O L A M A : No. 14

[illegible][illegible]

G E R I K A Z A N M A : No. 14

[illegible][illegible][illegible][illegible]

D E N E Y No. 15

HV = 1690.148 W/M²*°C

BI = 0.092

DX = 0.022 Mt. MX = 25.000

DT = 300.000 Sn. MT = 18.000

D = 0.105 Mt. V = 34.660 Lt/dk. H = 0.530

DP = 0.020 Mt.

TAT = 15.500°C. TAL = 65.000°C

TDQ = 15.500°C. TAO = 0.000°C.

DEPOLAMA : No. 15

	J =	1	3	5	7	9	11	13	15	17
I= 1	TA	65.00	65.00	65.00	65.00	65.00	65.00	65.00	65.00	65.00
4	"	21.69	35.56	46.91	54.29	58.54	60.81	61.96	62.53	62.79
7	"	16.27	20.72	28.20	36.61	44.20	50.14	54.35	57.12	58.84
10	"	15.60	16.62	19.44	24.19	30.22	36.61	42.52	47.48	51.32
13	"	15.51	15.71	16.53	18.43	21.65	26.01	31.07	36.30	41.20
16	"	15.50	15.54	15.74	16.36	17.69	19.93	23.11	27.04	31.41
19	"	15.50	15.51	15.55	15.73	16.19	17.14	18.74	21.07	24.09
22	"	15.50	15.50	15.51	15.55	15.70	16.04	16.73	17.89	19.62
25	"	15.50	15.50	15.50	15.51	15.55	15.67	15.92	16.43	17.28
I= 1	TD	15.50	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
4	"	15.50	26.49	39.42	49.20	55.33	58.79	60.62	61.53	61.98
7	"	15.50	17.53	23.09	30.92	39.00	45.93	51.19	54.83	57.18
10	"	15.50	15.84	17.42	20.89	26.08	32.21	38.38	43.90	48.41
13	"	15.50	15.55	15.93	17.08	19.40	22.99	27.56	32.64	37.71
16	"	15.50	15.51	15.59	15.91	16.74	18.36	20.90	24.31	28.35
19	"	15.50	15.50	15.52	15.60	15.85	16.46	17.61	19.44	21.98
22	"	15.50	15.50	15.50	15.52	15.59	15.79	16.24	17.07	18.41
25	"	15.50	15.50	15.50	15.50	15.52	15.58	15.74	16.07	16.68

[illegible]

G E R I K A Z A N M A : No. 15

	J =	1	3	5	7	9	11	13	15	17
I= 1	TA	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
4	"	56.87	37.83	22.40	12.40	6.65	3.58	2.03	1.28	0.92
7	"	63.98	57.14	46.46	34.73	24.27	16.13	10.39	6.62	4.29
10	"	64.87	62.51	57.83	50.71	42.02	33.02	24.78	17.93	12.65
13	"	64.98	63.49	61.61	58.15	53.05	46.52	39.18	31.75	24.87
16	"	65.00	63.92	62.64	60.85	58.16	54.32	49.33	43.43	37.06
19	"	65.00	63.96	62.89	61.67	60.10	57.93	54.94	51.04	46.32
22	"	65.00	63.97	62.95	61.90	60.74	59.35	57.53	55.13	52.03
25	"	65.00	63.97	62.96	61.95	60.93	59.84	58.57	57.02	55.03

I= 1	TD	65.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
4	"	65.00	49.58	31.90	18.62	10.31	5.63	3.17	1.94	1.34
7	"	65.00	61.31	53.06	41.99	30.78	21.24	14.05	9.09	5.89
10	"	65.00	63.53	60.44	54.96	47.32	38.57	29.91	22.24	16.02
13	"	65.00	63.90	62.40	59.91	55.93	50.38	43.62	36.31	29.14
16	"	65.00	63.96	62.85	61.44	59.38	56.35	52.16	46.90	40.89
19	"	65.00	63.97	62.94	61.84	60.54	58.80	56.39	53.13	48.99
22	"	65.00	63.97	62.95	61.94	60.88	59.67	58.16	56.18	53.58
25	"	65.00	63.97	62.96	61.96	60.97	59.95	58.82	57.48	55.81

	J =	1	3	5	7	9	11	13	15	17
I= 1	TBA	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
4	"	0.84	0.45	0.14	-0.06	-0.18	-0.24	-0.27	-0.29	-0.29
7	"	0.98	0.84	0.63	0.39	0.18	0.01	-0.10	-0.18	-0.23
10	"	1.00	0.95	0.86	0.71	0.54	0.35	0.19	0.05	-0.06
13	"	1.00	0.97	0.93	0.86	0.76	0.63	0.48	0.33	0.19
16	"	1.00	0.98	0.95	0.92	0.86	0.78	0.68	0.56	0.44
19	"	1.00	0.98	0.96	0.93	0.90	0.86	0.80	0.72	0.62
22	"	1.00	0.98	0.96	0.94	0.91	0.89	0.85	0.80	0.74
25	"	1.00	0.98	0.96	0.94	0.92	0.90	0.87	0.84	0.80

I= 1	TBD	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
4	"	1.00	0.69	0.33	0.06	-0.10	-0.20	-0.25	-0.27	-0.29
7	"	1.00	0.93	0.76	0.54	0.31	0.12	-0.03	-0.13	-0.19
10	"	1.00	0.97	0.91	0.80	0.64	0.47	0.29	0.14	0.01
13	"	1.00	0.98	0.95	0.90	0.82	0.70	0.57	0.42	0.28
16	"	1.00	0.98	0.96	0.93	0.89	0.83	0.74	0.63	0.51
19	"	1.00	0.98	0.96	0.94	0.91	0.87	0.83	0.76	0.68
22	"	1.00	0.98	0.96	0.94	0.92	0.89	0.86	0.82	0.77
25	"	1.00	0.98	0.96	0.94	0.92	0.90	0.88	0.85	0.81

D E N E Y No. 16

HV =1654.186 W/M³*°C

BI = 0.090

DX = 0.022 Mt. MX = 25.000

DT = 300.000 Sn. MT = 18.000

D = 0.105 Mt. V = 33.640 Lt/dk. H = 0.530

DP = 0.020 Mt.

TAT= 19.500°C. TAL= 55.000°C

TDO= 21.000°C. TAO= 21.500°C.

DEPOLAMA : No. 16

	J =	1	3	5	7	9	11	13	15	17
I= 1	TA	55.00	55.00	55.00	55.00	55.00	55.00	55.00	55.00	55.00
4	"	25.25	34.55	42.22	47.29	50.27	51.89	52.73	53.15	53.36
7	"	21.53	24.48	29.43	35.04	40.17	44.25	47.19	49.16	50.40
10	"	21.07	21.71	23.55	26.65	30.63	34.88	38.87	42.27	44.95
13	"	21.01	21.11	21.62	22.83	24.89	27.73	31.06	34.53	37.84
16	"	21.00	20.99	21.09	21.47	22.29	23.71	25.75	28.30	31.16
19	"	21.00	20.97	20.97	21.05	21.32	21.90	22.89	24.36	26.29
22	"	21.00	20.97	20.94	20.94	21.00	21.19	21.60	22.30	23.37
25	"	21.00	20.97	20.94	20.92	20.91	20.95	21.09	21.37	21.88

I= 1	TD	21.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
4	"	21.00	28.33	37.00	43.67	47.94	50.40	51.73	52.41	52.75
7	"	21.00	22.32	25.97	31.14	36.55	41.27	44.91	47.47	49.17
10	"	21.00	21.19	22.20	24.44	27.82	31.86	35.99	39.74	42.86
13	"	21.00	21.00	21.22	21.93	23.41	25.71	28.68	32.03	35.42
16	"	21.00	20.97	20.99	21.17	21.67	22.68	24.29	26.47	29.10
19	"	21.00	20.97	20.95	20.97	21.10	21.46	22.16	23.30	24.90
22	"	21.00	20.97	20.94	20.92	20.94	21.03	21.28	21.78	22.59
25	"	21.00	20.97	20.94	20.91	20.89	20.90	20.97	21.14	21.49

[illegible][illegible]

GERI KAZANMA : No. 16

	J =	1	3	5	7	9	11	13	15	17
I= 1	TA	21.50	21.50	21.50	21.50	21.50	21.50	21.50	21.50	21.50
4	"	50.81	41.02	33.06	27.83	24.77	23.10	22.24	21.81	21.60
7	"	54.48	50.82	45.29	39.24	33.80	29.52	26.45	24.41	23.12
10	"	54.93	53.52	50.98	47.26	42.76	38.10	33.80	30.18	27.35
13	"	54.99	54.12	52.86	50.94	48.23	44.83	41.03	37.16	33.55
16	"	55.00	54.23	53.37	52.27	50.74	48.66	46.03	42.96	39.65
19	"	55.00	54.25	53.49	52.67	51.68	50.41	48.76	46.68	44.20
22	"	55.00	54.25	53.52	52.77	51.99	51.09	50.00	48.64	46.96
25	"	55.00	54.25	53.52	52.80	52.08	51.32	50.50	49.54	48.39
I= 1	TD	55.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
4	"	55.00	47.03	37.95	31.04	26.64	24.11	22.75	22.05	21.70
7	"	55.00	52.93	48.62	42.92	37.12	32.14	28.33	25.65	23.89
10	"	55.00	54.04	52.29	49.38	45.42	40.90	36.40	32.38	29.07
13	"	55.00	54.22	53.25	51.81	49.66	46.75	43.24	39.45	35.71
16	"	55.00	54.25	53.47	52.55	51.33	49.65	47.42	44.68	41.56
19	"	55.00	54.25	53.51	52.75	51.89	50.83	49.46	47.69	45.51
22	"	55.00	54.25	53.52	52.80	52.05	51.24	50.30	49.15	47.70
25	"	55.00	54.25	53.52	52.81	52.10	51.37	50.61	49.76	48.75

	J =	1	3	5	7	9	11	13	15	17
I= 1	TBA	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
4	"	0.88	0.61	0.38	0.23	0.15	0.10	0.08	0.06	0.06
7	"	0.99	0.88	0.73	0.56	0.40	0.28	0.20	0.14	0.10
10	"	1.00	0.96	0.89	0.78	0.66	0.52	0.40	0.30	0.22
13	"	1.00	0.98	0.94	0.89	0.81	0.71	0.61	0.50	0.40
16	"	1.00	0.98	0.95	0.92	0.88	0.82	0.75	0.66	0.57
19	"	1.00	0.98	0.96	0.93	0.91	0.87	0.82	0.77	0.70
22	"	1.00	0.98	0.96	0.94	0.92	0.89	0.86	0.82	0.77
25	"	1.00	0.98	0.96	0.94	0.92	0.90	0.87	0.85	0.81
I= 1	TBD	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
4	"	1.00	0.78	0.52	0.33	0.20	0.13	0.09	0.07	0.06
7	"	1.00	0.94	0.82	0.66	0.50	0.36	0.25	0.17	0.12
10	"	1.00	0.97	0.92	0.84	0.73	0.60	0.48	0.36	0.27
13	"	1.00	0.98	0.95	0.91	0.85	0.77	0.67	0.56	0.46
16	"	1.00	0.98	0.96	0.93	0.90	0.85	0.79	0.71	0.62
19	"	1.00	0.98	0.96	0.94	0.91	0.88	0.84	0.79	0.73
22	"	1.00	0.98	0.96	0.94	0.92	0.89	0.87	0.84	0.79
25	"	1.00	0.98	0.96	0.94	0.92	0.90	0.88	0.85	0.82