

T. C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**REJENERATİF ISI DEĞİŞTİRGEÇLERİ YARDIMIYLA
ENERJİ GERİ KAZANIMI**

T. C.
Yükseköğretim Kurulu
Dokümantasyon Merkezi

Yasin VAROL

YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNA EĞİTİMİ ANABİLİM DALI

1991
ELAZIĞ

17-

T. C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**REJENERATİF ISI DEĞİŞTİRGEÇLERİ YARDIMIYLA
ENERJİ GERİ KAZANIMI**

Yasin VAROL

YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNA EĞİTİMİ ANABİLİM DALI

Bu Tez, Tarihinde, Aşağıda Belirtilen Jüri Tarafından
Oybirliği / Oyçokluğu İle Başarılı / Başarısız Olarak Değerlendirilmiştir.

(İmza)

(İmza)

(İmza)

Danışman

Prof. Dr. Mazhar ÜNSAL

ÖZET**Yüksek Lisans Tezi****REJENERATİF ISI DEĞİŞTİRGEÇLERİ YARDIMIYLA
ENERJİ GERİ KAZANIMI****Yasin YAROL****Fırat Üniversitesi
Teknik Eğitim Fakültesi
Makina Eğitimi Anabilim Dalı****1991, Sayfa : 106**

Bu çalışmada, dönel rejeneratif tip ısı değıştiricilerinin klima tesislerinde kullanılmasıyla ne kadarlık bir enerjinin geri kazanılacağı araştırılmıştır. Rejeneratör matrisi ile birlikte dönen bir gözlemci için geçerli kısmi türevli denklemler elde edilmiştir. Kısmi türevli denklemler, rejeneratör matris malzemesi içindeki eksenel ısı iletimi ihmal edilerek türetilmiştir. Bu denklemleri çözmek için sonlu farklar yöntemi uygulanmış ve bir bilgisayar programı hazırlanmıştır. Hesaplama sonuçlarından bir dönel rejeneratörün performans eğrileri elde edilmiştir.

Akışkanların kapasite debileri oranı C^* , matrisin boyutsuz kapasite debisi C_r^* , düzeltilmiş transfer birimleri sayısı $N_{w,o}$ ve akışkanların ısı taşınım oranı $(hA)^*$ gibi boyutsuz parametrelerin rejeneratör performansı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar örnek bir klima tesisine uygulanmış ve tesisde dönel rejeneratör kullanılmasıyla realize edilecek enerji tasarrufu hesaplanmıştır.



Anahtar Kelimeler : Dönel rejeneratör, Isıl depolama tip ısı değiştiricisi,
Enerji geri kazanma.

SUMMARY

Masters Thesis

ENERGY RECOVERY BY MEANS OF ROTARY TYPE REGENERATIVE HEAT EXCHANGERS

Yasın YAROL

Fırat University

Institute of Science and Technology

Mechanical Education Department

1991, Page : 106

In this study, the amount of energy recovery by using rotary regenerators in air-conditioning plants was investigated. Differential equations valid for an observer rotating with regenerator matrix were obtained. These equations were derived neglecting the axial heat conduction in the regenerator matrix. In order to solve these equations, a computer program was developed based on the finite difference method. From the calculation results, performance curves for a rotary regenerator were plotted.

Effects of parameters such as heat capacity ratio of fluids C^* , matrix heat capacity rate C_r^* , number of modified transfer units $N_{tu,o}$ and dimensionless heat conductance of fluids $(hA)^*$ on regenerator performance were examined. For a model air-conditioning plant, the amount of energy savings resulting from the use of a rotary regenerator was calculated.

Key words: Rotary regenerators, thermal storage type heat exchanger, energy recovery.

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın önerilmesi, sürdürülmesi ve tamamlanmasında her türlü yardımını esirgemeyen ve çalışmalarımı yakından ilgilenen Sayın Danışman Hocam Prof.Dr. Mazhar ÜNSAL' a teşekkür etmeyi bir borç bilirim.

Çalışmalarına yardımcı olan Teknik Eğitim Fakültesi Elektronik Bilgisayar Eğitimi Bölüm Başkanı Sayın Doç. Dr. Asaf VAROL' a ve Makina Mühendisliği Bölümü Öğretim Üyelerinden Sayın Doç. Dr. Vedat TANYILDIZI' na teşekkür etmeyi bir borç bilirim.

Ayrıca, Fırat Üniversitesi Bilgi İşlem Merkezindeki tüm personele teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

| | <u>Sayfa</u> |
|--|--------------|
| Özet | iii |
| Summary | v |
| Teşekkür | vii |
| İçindekiler | viii |
| Şekiller | xi |
| Tablolar | xiii |
| Semboller | xiv |
| 1. GİRİŞ | 1 |
| 1.1. Isı Değiştiricilerinin Sınıflandırılması | 1 |
| 1.1.1. Isı Değişim Şekline Göre Sınıflandırma | 1 |
| 1.1.1.1. Akışkanların doğrudan doğruya temaslı olduğu ısı değiştiricileri | 2 |
| 1.1.1.2. Akışkanların arasında doğrudan temasın olmadığı ısı değiştiricileri | 2 |
| 1.1.2. Isı Transferi Yüzeyinin Isı Transferi Hacmine Oranına Göre Sınıflandırma | 3 |
| 1.1.3. Konstrüksiyon Özelliklerine Göre Sınıflandırma | 4 |
| 1.1.3.1. Borulu Isı Değiştiricileri | 4 |
| 1.1.3.2. Levhalı Isı Değiştiricileri | 5 |
| 1.1.3.3. Kanatlı Yüzeyle Isı Değiştiricileri | 5 |

| | |
|---|-----------|
| 1.1.3.4. Rejeneratif Isı Değiştiricileri | 6 |
| 1.1.4. Akıma Göre Sınıflandırma | 8 |
| 1.1.4.1. Tek Geçişli Isı Değiştiricileri | 8 |
| 1.1.4.2. Çok Geçişli Isı Değiştiricileri | 9 |
| 1.1.5. Farklı Akışkan Sayısına Göre Sınıflandırma | 9 |
| 1.1.6. Isı Transferi Mekanizmalarına Göre Sınıflama | 9 |
| 1.1.6.1. İki tarafında tek fazlı ısı taşınımı olan ısı değiştiricileri | 9 |
| 1.1.6.2. Bir tarafında tek fazlı diğer tarafında iki fazlı ısı taşınımı olan ısı değiştiricileri | 10 |
| 1.1.6.3. İki tarafında iki fazlı ısı taşınımı olan ısı değiştiricileri | 10 |
| 1.1.6.4. Taşınım ve ışınımın bir arada olduğu ısı değiştiricileri | 10 |
| 1.1.7. Akışkan Fazlarına Göre Sınıflama | 10 |
| 1.1.7.1. Sıvı-Sıvı Isı Değiştiricileri | 11 |
| 1.1.7.2. Gaz-Gaz Isı Değiştiricileri | 11 |
| 1.1.7.3. Sıvı-Gaz Isı Değiştiricileri | 11 |
| 1.2. Dönel Rejeneratif Isı Değiştiricilerinin Tanımı | 12 |
| 1.2.1. Performans ve İşletme | 15 |
| 1.3. Literatür Araştırması | 18 |
| 2. BASINÇ KAYIPLARININ HESABI | 26 |
| 2.1. Dönel Rejeneratör Matrisleri için Sürtünme ve Colburn Faktörleri | 31 |

| | |
|--|-----------|
| 2.2. Dönel Rejeneratörlerin Matris Yüzey Geometrilere | 38 |
| 3. REJENERATÖRLERİN MATEMATİKSEL MODELLEMESİ VE SAYISAL ANALİZİ | 43 |
| 3.1. Varsayımlar | 44 |
| 3.2. İlgili Kısmi Türevli Denklemler | 45 |
| 3.3. Kısmi Türevli Denklemlerin Boyutsuz Hale Getirilmesi | 53 |
| 3.4. Rejeneratör Etkinliği | 57 |
| 3.5. Kısmi Türevli Denklemlerin Çözümü | 58 |
| 4. SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME | 70 |
| 4.1. Rejeneratör Performans Eğrileri | 70 |
| 4.2. Enerji Geri Kazanım Hesabı | 79 |
| Kaynaklar | 89 |
| Ekler | 93 |

ŞEKİLLER

| | <u>Sayfa</u> |
|-------------|---|
| Şekil 1.1 : | Dönel Rejeneratör Tipleri. 8 |
| Şekil 1.2 : | Dönel Rejeneratör Şeması. 13 |
| Şekil 1.3 : | Temizleme Bölümü İle Donatılmış Dönel Rejeneratör. 17 |
| Şekil 1.4 : | Dönel Rejeneratörlerde Fanların Konumu. 18 |
| Şekil 2.1 : | Matris Kanalı Boyunca Basınç Kaybı. 26 |
| Şekil 2.2 : | Kare Kanallar İçin Giriş ve Çıkış Basınç Kayıp Katsayısı. 32 |
| Şekil 2.3 : | Üçgen Kesitli Kanallar İçin Giriş ve Çıkış Basınç Kayıp Katsayısı. 32 |
| Şekil 2.4 : | Üçgensel Kanallar İçin Fanning Sürtünme ve Colburn Faktörleri ($L/r_{hd} = \infty$). 34 |
| Şekil 2.5 : | Dikdörtgen Kanallar İçin Fanning Sürtünme ve Colburn Faktörleri ($c/d = 8$). 34 |
| Şekil 2.6 : | Dikdörtgen Kanallar İçin Fanning Sürtünme ve Colburn Faktörleri ($c/d = 3$). 35 |
| Şekil 2.7 : | Kare Kanallar İçin Fanning Sürtünme ve Colburn Faktörleri ($c/d = 1$). 35 |
| Şekil 2.8 : | Dönel Rejeneratörlerde Kullanılan Matris Yüzey Geometrileri. 40 |
| Şekil 3.1 : | Matematiksel Analiz İçin Dönel Rejeneratör Şeması. 43 |
| Şekil 3.2 : | Bazı Gazların Sabit Basınç Özgül Isıları. 45 |

| | | |
|-------------|---|----|
| Şekil 3.3 : | Sıcak Akışkan Tarafı İçin Diferansiyel Elemanlar. | 46 |
| Şekil 3.4 : | Soğuk Akışkan Tarafı İçin Diferansiyel Elemanlar. | 51 |
| Şekil 3.5 : | Sonlu Farklar Ağ Sistemi. | 61 |
| Şekil 4.1 : | Rejeneratör Etkinliğinin Düzeltilmiş Transfer Birimleri Sayısına Göre Değişimi. | 72 |
| Şekil 4.2 : | Matris Üzerinde Sabit Bir Noktanın Sıcaklık Değişimi ($C^* = 0.95$, $C_r^* = 1$ ve $N_{tu,o} = 1.5$ için). | 75 |
| Şekil 4.3 : | Matris Üzerinde Sabit Bir Noktanın Sıcaklık Değişimi ($C^* = 1.00$, $C_r^* = 5$ ve $N_{tu,o} = 10$ için). | 76 |
| Şekil 4.4: | Sıcak Peryod Sonunda Matris İçindeki Sıcaklık Dağılımı ($C^* = 0.95$, $C_r^* = 1$ ve $N_{tu,o} = 1.5$ için). | 77 |
| Şekil 4.5: | Soğuk Peryod Sonunda Matris İçindeki Sıcaklık Dağılımı ($C^* = 0.95$, $C_r^* = 1$ ve $N_{tu,o} = 1.5$ için). | 77 |
| Şekil 4.6 : | Rejeneratörün Çıkışındaki Sıcak Akışkan Sıcaklığının Boyutsuz Zamana Göre Değişimi ($C^* = 0.95$, $C_r^* = 1$ ve $N_{tu,o} = 1.5$ için). | 78 |
| Şekil 4.7 : | Rejeneratörün Çıkışındaki Soğuk Akışkan Sıcaklığının Boyutsuz Zamana Göre Değişimi ($C^* = 0.95$, $C_r^* = 1$ ve $N_{tu,o} = 1.5$ için). | 78 |
| Şekil 4.8 : | Akışkanların Kapasite Debileri Oranına Göre Rejeneratör Etkinlik Değerleri ($C_r^* = 5$ ve $N_{tu,o} = 10$ için). | 79 |

TABLULAR**Sayfa**

| | | |
|--------------------|---|-----------|
| Tablo 4.1 : | Düzeltilmiş Transfer Birimleri Sayısına ve Boyutsuz Matris Kapasite Debisine Göre Rejeneratör Etkinlik Değerleri. | 71 |
| Tablo 4.2 : | Isı Taşınım Kondüktans Oranlarına Göre Rejeneratör Etkinlik Değerleri. | 73 |
| Tablo 4.3 : | Düzeltilmiş Transfer Birimleri Sayısına ve Boyutsuz Matris Kapasite Debisine Göre Rejeneratör Etkinlik Değerleri (Kays ve London, 1964). | 74 |

SEMBOLLER

| | | |
|-----------|---|-------------|
| A | : Isı transfer yüzey alanı | (m^2) |
| A_{cr} | : Matrisin kesit alanı | (m^2) |
| A_{fr} | : Cephe alanı | (m^2) |
| A_o | : Serbest akış alanı | (m^2) |
| b | : Matrisin kalınlığı | (m) |
| C | : Akışkanın kapasite debisi, mC_p | (W/K) |
| C^* | : Akışkanların kapasite debileri oranı, C_{min}/C_{max} | $(-)$ |
| C_p | : Akışkanın sabit basınç özgül ısısı | (J/kgK) |
| C_r | : Matris kapasite debisi | (W/K) |
| C_r^* | : Matris boyutsuz kapasite debisi, C_r/C_{min} | $(-)$ |
| c_w | : Matris malzemesinin özgül ısısı | (J/kgK) |
| D_{hyd} | : Hidrolik çap | (m) |
| D_R | : Matris çapı | (m) |
| f | : Fanning sürtünme faktörü | $(-)$ |
| G | : Kütlesel Hız | (kg/m^2s) |
| g | : Yerçekimi ivmesi | (m/s^2) |
| h | : Isı taşınım katsayısı | (W/m^2K) |
| J | : Colburn faktörü | $(-)$ |
| k | : Isı iletim katsayısı | (W/mK) |
| K_e | : Ani daralma kayıp katsayısı | $(-)$ |

| | | |
|-----------|---|--------------------|
| K_e | : Ani genişleme kayıp katsayısı | (-) |
| L | : Matris boyu | (m) |
| M_v | : Matrisin toplam kütlesi | (kg) |
| m | : Kütlesel debi | (kg/s) |
| N | : Matrisin dönme hızı | (s ⁻¹) |
| n | : Rejeneratörün sıcak veya soğuk tarafına uygulanan dilimlerin sayısı | (-) |
| $N_{w,c}$ | : Soğuk taraftaki transfer birimleri sayısı | (-) |
| $N_{w,H}$ | : Sıcak taraftaki transfer birimleri sayısı | (-) |
| $N_{w,o}$ | : Düzeltilmiş transfer birimleri sayısı | (-) |
| Nu | : Nusselt sayısı | (-) |
| p | : Statik basınç (Pa), Sonlu fark ağındaki noktaların rejeneratör eksenini doğrultusundaki kordinatı | (-) |
| P_c | : Soğuk periyod süresi | (s) |
| P_H | : Sıcak periyod süresi | (s) |
| Pr | : Prandtl sayısı | (-) |
| Re | : Reynolds sayısı | (-) |
| r_{hyd} | : Hidrolik yarıçap | (m) |
| s | : Sonlu fark ağındaki noktaların zaman eksenini kordinatı | (-) |
| St | : Stanton sayısı | (-) |
| T | : Sıcaklık | (K) |
| t | : Zaman | (s) |
| \bar{T} | : Ortalama sıcaklık | (K) |

| | | |
|-----------------|---|-----------------------------------|
| T^* | : Boyutsuz sıcaklık | (-) |
| t^* | : Boyutsuz zaman | (-) |
| U | : Hız | (m/s) |
| V | : Rejeneratör matrisinin toplam hacmi | (m ³) |
| v | : Özgül hacim | (m ³ /kg) |
| z | : Rejeneratör girişinden itibaren aksenal yöndeki mesafe | (m) |
| z^* | : Boyutsuz mesafe | (-) |
| β | : Isı transfer yüzey alan yoğunluğu, A/V | (m ² /m ³) |
| ΔA_{cr} | : Diferansiyel kesit alanı, (Şekil 3.1) | (m ²) |
| ϵ | : Rejeneratör etkinliği | (-) |
| ϵ' | : İç etkinlik | (-) |
| η_f | : Fan etkinliği | (-) |
| ρ | : Yoğunluk | (kg/m ³) |
| μ | : Dinamik viskozite | (Pa s) |
| σ | : Gözeneklilik, A_o/A_{fr} | (-) |
| τ_v | : Matris yüzeyindeki kayma gerilmesi | (Pa) |
| ν | : Kinematik viskozite | (m ² /s) |

İndis

| | |
|-------|---|
| c | : Soğuk taraf, Soğuk akışkan |
| c,i | : Rejeneratör girişindeki soğuk akışkan |
| c,o | : Rejeneratör çıkışındaki soğuk akışkan |
| f | : Akışkan |

| | | |
|----------------------|---|--|
| H | : | Sıcak taraf, Sıcak akışkan |
| H_i | : | Rejeneratör girişindeki sıcak akışkan |
| H_o | : | Rejeneratör çıkışındaki sıcak akışkan |
| m | : | Ortalama |
| max | : | Maksimum |
| min | : | Minimum |
| w | : | Duvar |



1.GİRİŞ

Enerji ve ekonomik başarı birbiriyle yakından ilişkilidir. Endüstriyel gelişim için gerekli olan üretim artışı; daha çok enerji tüketimini gerektirmektedir. Şu anda, enerji ihtiyacının önemli bir bölümü fosil yakıtları ile karşılanmaktadır. Bu yakıtların rezervleri sınırlıdır ve bu yüzden maliyetleri yüksektir. Bunun neticesi olarak, fosil-yakıtlı enerji kaynaklarından yeni alternatif enerji kaynaklarına geçiş periyodunda, bu sınırlı kaynakları mümkün olduğu kadar verimli kullanmak gereklidir.

Sınırlı enerji kaynaklarının verimli kullanımını teşvik eden en çekici yöntemlerden biri, ısı enerjisinin geri kazanılmasıdır. Kazanlarda ve fırınlarda yanma için gerekli olan hava, baca gazları yardımıyla ön ısıtmaya tabi tutulabilirse; yanma ile ortaya çıkan ısı enerjisinin bir kısmı sistemden atılmayacağı için, yakıttan tasarruf sağlanır.

1.1. Isı Değiştiricilerinin Sınıflandırılması

Isı değiştiricisi; sıcak bir akışkandan soğuk bir akışkana ısı transferini sağlayan bir cihazdır. Isı değiştiricilerinin sınıflandırılması çok değişik şekillerde yapılabilir (Genceli, 1983).

1.1.1. Isı Değişim Şekline Göre Sınıflandırma

Bu sınıflandırmada ısı değiştiricileri, akışkanların arasında

doğrudan doğruya bir temasın olduğu ve olmadığı tipler olarak iki grupta gözönüne alınır.

1.1.1.1. Akışkanların doğrudan doğruya temaslı olduğu ısı değiştiricileri:

Sıcak ve soğuk akışkanlar birbirleriyle doğrudan doğruya karıştırılır. Genellikle akışkanların biri gaz diğeri de buharlaşma basıncı düşük olan sıvıdır. Isı transferi işleminden sonra iki akışkan birbirinden ayrılır.

1.1.1.2. Akışkanlar arasında doğrudan temasın olmadığı ısı değiştiricileri:

Isı, önce sıcak akışkandan iki akışkanı ayıran bir yüzeye veya bir kütleye geçer. Bu yüzeyden ve kütlede de soğuk akışkana iletilir. Bu tip ısı değiştiricileri üç grupta incelenebilir.

a. Doğrudan ısı transferi olan ısı değiştiricileri: Bu tip ısı değiştiricilerinde farklı sıcaklıklardaki iki akışkan, ince bir boru veya levha yüzeyi ile birbirlerinden ayrılırlar ve ısı değiştiricisi içerisinde karışmadan hareket ederler. Bu tip ısı değiştiricisinde hareketli bir eleman yoktur. Literatürde bazen reküperatif ısı değiştirici olarak adlandırılır.

b. Isının depolandığı ısı değiştiricileri: Bunlarda önce sıcak akışkan belirli bir zaman süresince bir yüzey üzerinden geçirilerek bu yüzey ısıtılır. Daha sonra ısınan bu yüzey üzerinden soğuk akışkan

geçirilerek, soğuk akışkanın ısınması sağlanır. Bu tür ısı değiştircilerine rejeneratör adı da verilir.

c. Akışkan yataklı ısı değiştircileri: Bu tipte akışkanlardan birinin içine küçük taneli kum veya kömür gibi katı tanecikler konulur. Tanecikler ısıyı diğer akışkana iletmeye yarar. Taneciklerden meydana getirilen yatakta eğer akışkan hızı belirli bir değerde ise katı tanecikler bu yatak içinde hareketli olacaktır. Bu taneciklerin hareketi ısı geçişini iyileştirir. Yatak içinde sabit bir sıcaklık dağılımı sağlar. Bu tür ısı değiştircileri kurutmada, karıştırmada, absorpsiyonlu sistemlerde ve reaktör mühendisliğinde kullanılır.

1.1.2. Isı Transferi Yüzeyinin Isı Değiştirci Hacmine Oranına Göre Sınıflandırma

Bu sınıflandırma için ısı değiştircilerinde aşağıda gösterilen β büyüklüğü tanımlanır.

$$\beta = \frac{\text{Isı transferi yüzeyi}}{\text{Isı değiştircisinin hacmi}} \quad (\text{m}^2/\text{m}^3)$$

Bu tanıma göre $\beta > 700 \text{ m}^2/\text{m}^3$ olan ısı değiştircileri kompakt, $\beta < 700 \text{ m}^2/\text{m}^3$ olan ısı değiştircileri ise kompakt olmayan olarak gözönüne alınır. A; ısı transferi yüzeyi, V; hacmi göstermektedir.

1.1.3. Konstrüksiyon Özelliklerine Göre Sınıflandırma

1.1.3.1. Borulu ısı değiştiricileri:

Bu tiplerde eliptik, dikdörtgen ve genellikle de daire kesitli borular kullanılır. Boru çaplarının, uzunluklarının ve diziliş şekillerinin değiştirilebilmesi nedeni ile projelendirmede esneklik mevcuttur.

a. Çift borulu ısı değiştiricileri: En basit borulu ısı değiştirici tipidir. Sistem genellikle aynı eksenli iki borudan yapılır. Akışkanlardan biri içteki borudan akarken, diğeri iki boru arasındaki boşluktan akar.

b. Spiral borulu ısı değiştiricileri: Bir veya daha fazla borudan yapılmış spiral ile, bu spiralin dışındaki bir depodan meydana gelir. Bu ısı değiştiricisinde ısı genleşmelerin oluşturduğu gerilme problemleri yoktur.

c. Gövde-Borulu ısı değiştiricileri: Bu ısı değiştiricileri, silindirik bir gövde ile bunun içindeki birbirine paralel borulardan meydana gelir. Akışkanlardan biri boruların içinden, diğeri ise gövde içinden akar. Bu ısı değiştiricisinin ana elemanları; borular (veya boru demeti), gövde, boruların tespit edildiği ön ve arka aynalar ile gövde içindeki akışı yönlendiren şaşırtma levhalarıdır. Bu tip ısı değiştiriciler, petrol rafinerilerinde, termik santrallerde, kimya endüstrisinde çok fazla uygulama alanı bulur. Gövde içindeki akışkan hareketini yönlendirmek, akışı türbölanslı yapıp ölü bölgeleri azaltmak ve boruları desteklemek

amacıyla gövde içinde şaşırtma elemanları kullanılır.

1.1.3.2. Levhalı ısı değiştircileri:

Bunlar genellikle ince levhalardan yapılır. Borulu tipten olan ısı değiştircilerine göre yüksek basınç ve sıcaklıklarda kullanılamaz.

a. Contalı levhalı ısı değiştircileri: İnce levhalardan bir paket yapılarak elde edilir. Metal levhalar arasında contalar vardır. Levhalar arasındaki boşluklardan akışkanlar akar. Isı transferi bütün levha yüzeyince olur.

b. Spiral levhalı ısı değiştircileri: İki ince madeni levhanın spiral şeklinde sarılması ile elde edilir. İki levha arasına konan saptamalar ile düzgün bir boşluk sağlanabilir. Levhaların iki tarafı contalı bir kapak ile kapatılır. Akışkanlar birbirine ters veya paralel akacak şekilde düzenlenebilir.

c. Lamelli ısı değiştircileri: Gövde içine yassılaştırılmış boru demetinin yerleştirilmesi ile elde edilir. Bu borulara lamel adı verilir ve genellikle nokta veya elektrikli dikiş kaynağı ile birbirlerine tutturulur. Kağıt, besin ve kimya endüstrisinde çok kullanılır.

1.1.3.3. Kanatlı yüzeyli ısı değiştircileri:

Isı değiştircisinin kompaktlığı artırılmak istenirse, ısı

değiştiricisinin ısıtma yüzeylerine kanatlar ilave edilerek yüzey artırılabilir. Prensip olarak ilave yüzeyler ısı taşınım katsayısı küçük olan akışkan tarafına konulur.

a. Levhalı kanatlı ısı değiştiricileri: Bu tip ısı değiştiricilerinde kanatlar; paralel levhalar halindeki yüzeyler arasında mekanik olarak preslenerek, lehimlenerek veya kaynak edilerek tutturulur.

b. Borulu kanatlı ısı değiştiricileri: Genellikle bir tarafında gaz diğer tarafında sıvı bulunan ısı değiştiricilerinde, sıvı tarafındaki ısı taşınım katsayısı gaz tarafına göre daha yüksektir. Bu yüzden sıvı taraf kanat gerektirmez. Ayrıca genelde sıvı tarafındaki basınç, gaz tarafındaki basınçtan daha yüksektir. Mukavemet bakımından yüksek basınca uygun geometri silindir olduğundan, ısı değiştiricilerinde yüksek basınçlı akışkan boru içinden akıtılır.

1.1.3.4. Rejeneratif ısı değiştiricileri:

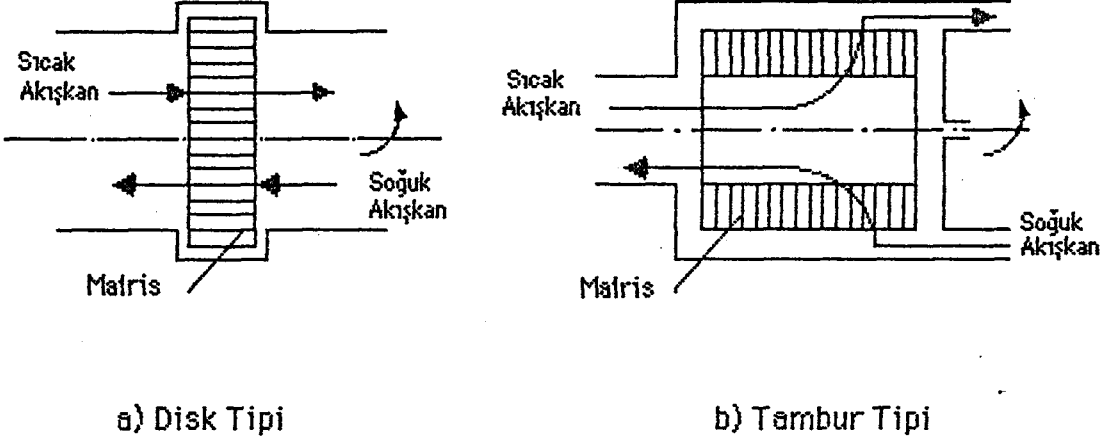
Isının anlık depolanarak transfer edildiği ısı değiştiricileridir. Rejeneratör içinde ısı, matris adı verilen gözenekli elemanlarda depolanır ve transfer edilir. Bu tipte, sıcak ve soğuk akışkanlar aynı kanallardan ardışık olarak geçirilir. Sıcak akışkan bir kanaldan geçerken, ısı enerjisi, sıcak akışkandan kanal duvarlarına (matrise) transfer edilir ve enerji matriste depolanır. Daha sonra soğuk akışkan aynı kanaldan akmaya başlarken, matriste depolanan enerji soğuk akışkana transfer edilir. Bu ısı değişimi periyodik olarak devam eder. Bu depolama tip ısı değiştiricisine,

rejeneratif ısı değiştircisi veya kısaca "rejeneratör" denir (Kays ve London, 1964).

Rejeneratif ısı değiştircileri, konstrüksiyonlarına göre dönel ve sabit-matrisli rejeneratörler olarak iki gruba ayrılırlar. Ayrıca, dönel rejeneratörler, disk ve tambur tipi olarak sınıflandırılabilirler. Bir dönmenin tamamlandığı süreye "toplam peryod" denir. Bir rejeneratörün matrisi, genellikle petek şeklindeki kanallardan oluşmaktadır. Belli bir dönme peryodunda, her matris kanalından önce sıcak akışkan ve daha sonra soğuk akışkan geçer. Rejeneratörün dönmesi devam ettikçe ve sıcak akışkan matristen aktıkça, akışkanın iç enerjisinin bir kısmı matrise geçer ve orada depolanır. Daha sonra dönmeden dolayı aynı matris bu defa soğuk akışkanın akışına maruz kalır ve matriste depolanan enerji soğuk akışkana aktarılır. Bu değişim peryodik olarak tekrarlanır.

Disk tipi bir dönel rejeneratörde, matris bir disk şeklindedir. Sıcak ve soğuk akışkanlar aksel olarak (Şekil 1.1a)' daki gibi akmaktadır. Oysa tambur tipi bir dönel rejeneratörde matris, tambur şeklindedir ve akışkan yönü radyaldır (Şekil 1.1b). Sabit matrisli bir rejeneratörde matris dönmez, bunun yerine sıcak ve soğuk akışkanlar ardışık olarak matris kanallarından geçmektedir. Sıcak akışkanın rejeneratörde harcadığı süreye "sıcak peryod" denir. Bu peryodun sonunda, bir değişim meydana gelerek, sıcak akışkan akışı kapanır ve soğuk akışkan aynı kanallardan akmaya başlar. Soğuk akışkanın akma süresine de "soğuk peryod" denir. Soğuk peryod esnasında matris tarafından sıcak akışkandan depolanan ısı enerjisi, soğuk akışkan tarafından alınır. İşlem devam ettikçe sıcak ve

soğuk peryodlar, ardışık tekrarlanır.



Şekil 1.1: Dönel Rejeneratör Tipleri

1.1.4. Akıma Göre Sınıflandırma

Isı değiştircileri içinde akışkanların çeşitli şekillerde düzenlenmesi, ortalama logaritmik sıcaklık farkına, etkinliğe ve ısı değiştircisi içerisindeki ısıl gerilmelere etki eder. Akıma göre sınıflandırma tek ve çok geçişli olmak üzere iki ana grupta toplanabilir.

1.1.4.1. Tek geçişli ısı değiştircileri:

a. Paralel akımlı ısı değiştircileri: Akışkanlar ısı değiştircisinin bir ucundan girip aynı doğrultuda akarlar ve ısı değiştircisinin diğer ucundan çıkarlar.

b. Karşıt akımlı ısı değiştiricileri: Akışkanlar ısı değiştiricisi içinde birbirlerine göre ters yönde akarlar. Bu tip ısı değiştiricilerindeki ortalama logaritmik sıcaklık farkı, diğer bütün akış düzenlemelerinden daha büyüktür.

c. Çapraz akımlı ısı değiştiricileri: Akışkanlar ısı değiştiricisi içinde birbirlerine göre dik olarak akarlar. Akışkanlar ısı değiştiricisi içinde ilerlerken kendisi ile karışabilir veya karışmayabilir.

1.1.4.2. Çok geçişli ısı değiştiricileri:

Bundan önce incelediğimiz tek geçişli ısı değiştiricileri içerisinde farklı şekillerde ısı geçişleri düzenlenerek çok geçişli tipler elde edilebilir.

1.1.5. Farklı Akışkan Sayısına Göre Sınıflandırma

Pratikteki bir çok uygulamada, ısı değiştiricilerinde genellikle iki akışkan arasındaki ısı transferi gözönüne alınır. Buna karşılık az da olsa bazı kimyasal işlemlerde, soğutma teknolojisinde, hava ayırma, hidrojenin saflaştırılması ve sıvılaştırılması gibi olaylarda ikiden fazla akışkanlı ısı değiştiricileri ile karşılaşılabilir.

1.1.6. Isı Transferi Mekanizmalarına Göre Sınıflandırma

1.1.6.1. İki tarafında tek fazlı ısı taşımını olan ısı değiştiricileri:

Bu ısı değiştiricilerinin iki tarafındaki ısı taşınıımı zorlanmış akışlı veya doğal taşınımlı olabilir.

1.1.6.2. Bir tarafında tek fazlı, diğer tarafında iki fazlı ısı taşınıımı olan ısı değiştiricileri:

Isı değiştiricisinin bir tarafında tek fazlı akış varken, diğer tarafında kaynamakta veya yoğuşmaktaki olan iki fazlı bir akış olabilir. Bunlara ait örnekler termik santrallerin yoğuşturucuları, soğutma sistemlerinin yoğuşturucu ve buharlaştırıcıları sayılabilir.

1.1.6.3. İki tarafında iki fazlı ısı taşınıımı olan ısı değiştiricileri:

Bu ısı değiştiricisinin bir tarafında buharlaşma, diğer tarafında yoğuşma vardır. Bu tip ısı değiştiricisi, hidrokarbonların distilasyonunda buharın yoğuşturulmasında kullanılan tipleri mevcuttur.

1.1.6.4. Taşınım ve ışınıımın bir arada olduğu ısı değiştiricileri:

Yüksek sıcaklıkta çalışan sabit dolgu maddeli rejeneratörler ile buhar kazanlarının kızdırıcıları bu tip ısı değiştiricilerine örnek olarak verilebilir.

1.1.7. Akışkan Fazlarına Göre Sınıflandırma

Bu açıdan, ısı değiştiricileri sıvı-sıvı, gaz-gaz, sıvı-gaz ısı

değiştiricileri olarak üç tipe ayrılabilir.

1.1.7.1. Sıvı-Sıvı ısı değiştiricileri:

Genellikle gövde-borulu tiptendir. Çeşitli şekillerde yapılırlar. Boruların dışından geçen akışkan, perdelerle ayrılarak yolu ve hızı artırılır ve ısı taşınımı iyileştirilmiş olur.

Boruların yerleştirilişi itibari ile eşkenar üçgen yerleştirme en büyük basınç kaybını verdiği bilinmektedir. Buna karşılık eşkenar üçgen yerleştirme ısı transferi yönünden en iyisidir. Kare yerleştirme ise bazı imalat ve bakım kolaylıkları sağlar.

1.1.7.2. Gaz-Gaz ısı değiştiricileri:

Bir çok bakımlardan sıvı-sıvı ısı değiştiricilerinden farklıdırlar. ısı taşınım katsayıları sıvı-sıvı ısı değiştiricilerine nazaran 10-100 misli daha küçüktür, bunun sonucu olarakta yüzeyleri çok daha büyüktür. Buna karşılık daha hafif ve kaba bir imalat uygulanabilir. Akışkanlar arasındaki kaçaklar genelde daha az önemlidir.

1.1.7.3. Sıvı-Gaz ısı değiştiricileri:

En çok kullanılan ısı değiştiricisi tiplerindedir. Genellikle akışkanlar su ve havadır. Oto radyatörleri, uçak yağ soğutucuları, ısıtma, soğutma ve iklimlendirme tesisleri, kompresörler ve gaz türbin

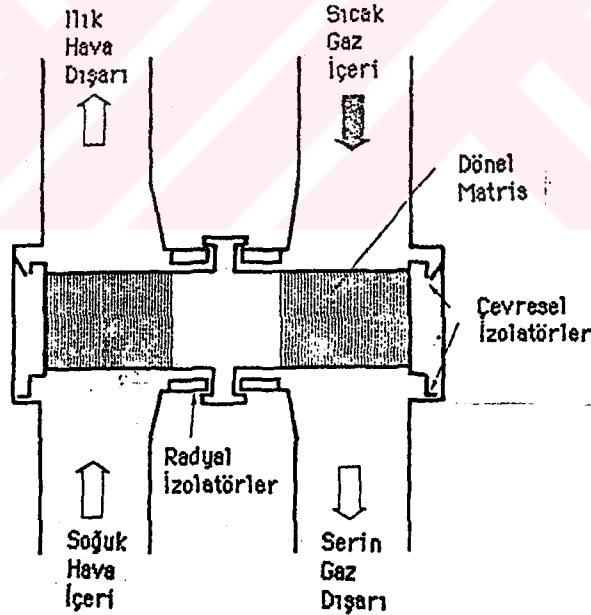
soğutucuları örnek olarak sayılabilir. Gaz tarafında ısı taşınım katsayısı çok küçük olduğundan, genellikle, kanatlı yüzey yapılıır. Gaz tarafındaki geçiş kesiti, sıvı tarafındakine nazaran çok daha büyüktür.

1.2. Dönel Rejeneratif Isı Değişiricilerinin Tanımı

Bu çalışmada, disk tipi dönel rejeneratörler incelenmiştir. Birçok dönel rejeneratörler kompakt ısı transferi cihazlarıdır. Disk tipi bir dönel rejeneratörün bir kısmı aralarında çok sayıda küçük kanalların bulunduğu oluklu levhalar içeren bir diskten oluşmaktadır. Bu kanalları ihtiva eden yapıya "matris" denir ve bu matris ısı transferi yüzeyleri ile akış kanallarını oluşturur. Matrisin paketleniği rotor bir kanal içerisine yerleştirilmiştir. Matrise giriş ve çıkış öyle tasarlanmıştır ki, sıcak ve soğuk akışkanlar rotorun dönme eksenine paralel olarak akarlar. Matrisdeki çok sayıda paralel kanaldan dolayı akışkanlar birbirine karışmazlar. Belli bir sayıdaki kanallar sıcak akışa maruz kalırken, diğer kanallardan soğuk akışkan geçer. Disk yavaşça dönerken, matrisin kanalları ardışık olarak sıcak ve soğuk akışkana yol verirler (Kays ve London, 1964).

Isı tekerleği, dönel hava ön ısıtıcısı, Munters tekerleği veya Ljungstrom tekerleği olarak bilinen dönel rejeneratörler, büyük güç tesislerinde ısı enerjisini geri kazanmak için yaklaşık 50 yıldan beri kullanılmaktadır. Ayrıca, iklimlendirme tesislerinde ve endüstride ısı enerjisi geri kazanma uygulamalarında kullanılmaktadırlar. 1975' te sadece Avrupada 15000 civarında dönel rejeneratörün kullanımda olduğu tahmin edilmektedir. Dönel rejeneratörün çalışma düzeneği Şekil 1.2' de

görülmektedir. Rejeneratör tekerleği iki bitişik kanalı karşılamaktadır. Bu kanallardan biri sıcak akışkanı taşımakta, diğeri ise ısıtılması gereken soğuk akışkanı taşımaktadır. Akışkan akışları ters yönlüdür. Tekerlek döndükçe, içerisinden geçen sıcak akışkandan ısı absorbe eder ve bu ısıyı daha soğuk olan akışkana transfer eder. Son zamanlardaki bir gelişme olan higroskopik tekerlek, iki kanal arasındaki rutubeti de transfer edebilmektedir. Dönel rejeneratörler, birçok diğeri ısı geri kazanma sistemlerinde olduğu gibi, sıcak iklimlerde büyük binaların iklimlendirilmesi için kullanılan havanın ön soğutması yapılarak enerji tasarrufu için kullanılabilir (Reay, 1981).



Şekil 1.2: Dönel Rejeneratör Şeması

Birçok firma üç değişik tip dönel rejeneratör üretmektedir. En yaygın şekil, örülmüş bir alüminyum veya paslanmaz çelik tel matristen yapılan bir tekerlektir. Bu matris ucuzdur. Hava akışının tekerlekten geçerken büyük bir yüzey alanına maruz kalmasından dolayı ısı transfer etkinliği yüksektir. Ancak bu tip matris boyunca sürtünme kayıpları oldukça yüksektir. Matrisin kirlenme eğilimi de diğer tiplere göre daha fazladır.

İçerisindeki matrisin oluklu hale getirildiği laminer akış tekerleklerinin geliştirilmesi, elek matrisin kirlenme problemini ve basınç kaybını hafifletmiştir. Bu tip tekerleklerin temizlenmesi daha kolaydır. Çünkü kirler matrisin yüzeyinde toplanmaktadır. Isıl etkinlik bakımından, oluklu bir metalik matris tekerleğinin performansı elek tipi matris performansına yakındır. Dönel rejeneratörlerde kullanılan üçüncü tür bir matris de metalik olmayan higroskopik matrislerdir. Higroskopik tekerlek olarak bilinen bu tip matris, rutubeti de transfer edebilir. Özellikle ısıtma ve havalandırma uygulamalarında kullanışlıdır. Yapısı, metalik laminer akış tekerleğine benzemektedir. Higroskopik tekerlek metalik tipten % 35 kadar daha pahalıdır (Reay, 1981).

800 °C 'nin üzerindeki akışkan sıcaklıklarında matris malzemesi olarak paslanmaz çelik kullanılmalıdır. Daha yüksek sıcaklıklarda da rejenerasyon sistemi gerekmektedir (Mesela gaz türbinlerinde ve çelik üretim tesislerinde). Yüksek sıcaklıklı uygulamalarda dolgu malzemesi olarak cam seramikler ve silisyum nitrürler kullanılmaktadır (Reay, 1981).

1.2.1. Performans ve İşletme

Dönel bir rejeneratörün performans ve çalışma karakteristiklerinin belirlenmesinde aşağıdaki faktörlerin hesaba alınması gereklidir (Reay, 1981).

1. Çalışma sıcaklığı: Metalik veya seramik olsun, kullanılan matrisin tipi, uygulamada karşılaşılabilecek çalışma sıcaklığına bağlıdır.

2. Çalışma basıncı: Genel olarak rejeneratörler; eksoz ve aktif gaz akışlarının yaklaşık olarak eşit basınçlara sahip olduğu yerlerde kullanılır. Matris için örülmüş elek kullanılmışsa, basınçlar eşitlenmediği takdirde elekten geçebilen büyük bir kaçak gaz potansiyeli mevcut olacaktır. Bir akışkandan diğer akışkana gaz kaçağının minimuma indirilmesi için, eksoz akışının aktif gaz akışından çokaz basınç farkıyla ve daha düşük bir basınçta çalıştırılması tercih edilebilir.

3. Gaz kirlenmesi: Temiz (aktif) gazın kirlenmemesi için rejeneratörlerde temizleme bölümü dizayn edilmelidir. Temiz gazın bir kısmını eksoz kanalına bırakarak aktif gazın kirlenmeden korunması mümkündür.

Yüksek sıcaklıklı metalik rejeneratörlerin bazılarında, temizleme için özel bir fan yerleştirilir. Bunlar, yüksek kapasiteli sistemlerde, 4 kW'a kadar elektrik enerjisi tüketebilir (Reay, 1981).

4. Sürtünme kayıpları: Isı değiştircisinden geçerken oluşan basınç kaybı, gaz hızı ve matris geometrisinin fonksiyonudur. Bazı üreticiler iki tip matris sunmaktadırlar. Birinci tip matris, optimum ısı transfer kabiliyeti için tasarlanmıştır. Ancak bu tiplerin yüzeyleri büyük olduğundan büyük sürtünme kayıpları olabilir. Daha büyük gözeneklere sahip olan matrislerde daha düşük bir basınç kaybı elde edilir.

5. Kontrol: Çoğu dönel rejeneratörler (yüksek sıcaklıklı seramik tipleri hariç) en büyük tekerlek çaplarında ve güçleri 0.5 KW 'a yaklaşan elektrik motorlarıyla tahrik edilmektedir. Optimum ısı transferi için, dönme hızı tipik olarak 10-20 devir/dakika 'dır. Bu hız azaldıkça, ısı etkinlik düşmektedir. Değişken ısı yükü olan uygulamalarda hız kontrolü kullanılmalıdır. Dönel rejeneratif tip ısı değiştircilerinin diğer ısı değiştircisi tiplerine nazaran üç temel avantajı vardır (Kays ve London, 1964).

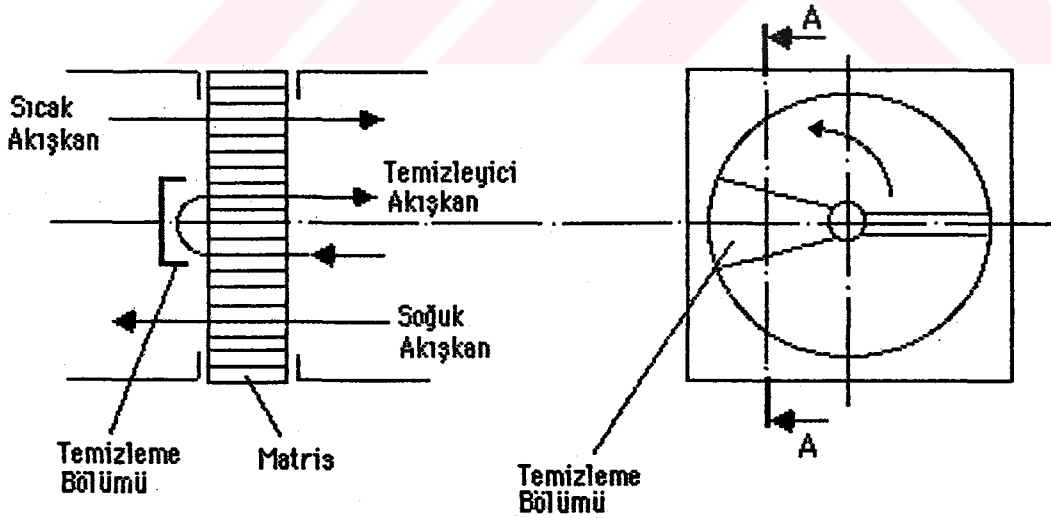
1. Daha kompakt bir ısı transferi yüzeyi mevcuttur.
2. Isı değiştircisi, birim ısı transferi alanı için daha ucuzdur.
3. Periyodik akış değişimlerinden dolayı yüzeyler, kendi kendini temizleme kabiliyetine sahiptir. Reküperatif ısı değiştircilerinde, akışkanlar ayrı kanallarda ve daima aynı yönde akar. Böylece bazı atıklar birikerek ısı transferinin azalmasına ve basınç kaybının artmasına sebep olabilirler. Dönel rejeneratörlerin dezavantajları ise aşağıdaki gibidir.

1. Sızıntılardan (kaçaklardan) dolayı sıcak ve soğuk akışkanlar az da olsa birbiriyile karışabilirler. Eğer herhangi bir temizleme bölümü (şekil 1.3) kullanılmıyorsa, akışkanların az miktarda karışmasını önlemek zordur.

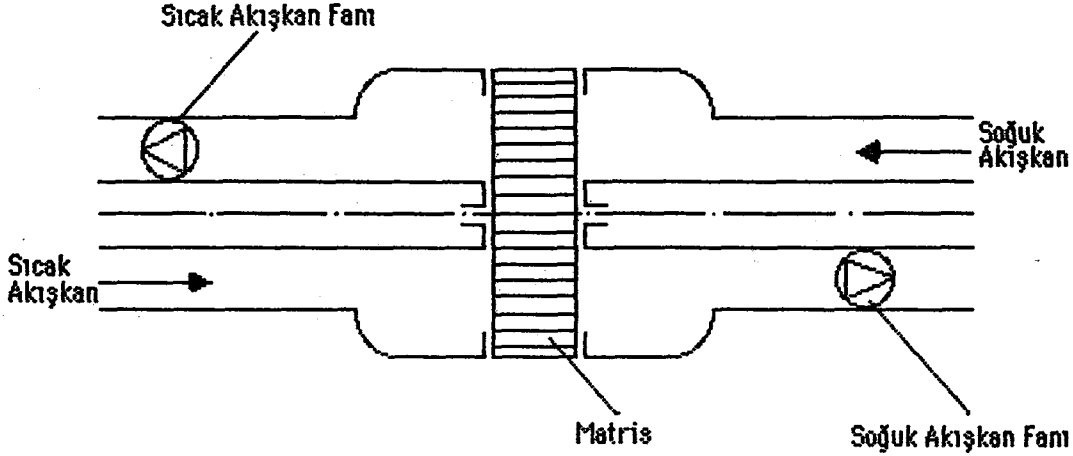
Çünkü matrisin dönmesi esnasında, kanallarda sıkışan sıcak akışkan soğuk tarafa taşınabilir. Diğer kanallardaki soğuk akışkan da sıcak tarafa geçebilir. Bu tip sızıntıya "taşma sızıntısı" denir. Sızıntılar ısı değıştircisi etkinliğini azaltır. Sızıntı istenmiyorsa temizleme bölümünün ilavesiyle ortadan kaldırılabilir. Temizleme bölümünde az miktarda temiz hava tekerleğe doğru üflenir ve dışarıya atılır.

2. Akışkanlar farklı basınçlarda iseler sızıntı problemi önem kazanır. Kazan ve fırınlarının hava ön ısıtıcılarında kullanılan rejeneratörler için, kaçak problemi o kadar önemli değildir, çünkü sıcak ve soğuk akışkanlar (yanma havası ve baca gazları) yaklaşık olarak aynı basınçtadır.

3. Fazla kompaktlıktan dolayı, basınç kayıpları reküperatörlerden daha büyüktür.



Şekil 1.3: Temizleme Bölümü ile Donatılmış Dönel Rejeneratör



Şekil 1.4: Dönel Rejeneratörlerde Fanların Konumu

1.3. Literatür Araştırması

Dönel bir rejeneratif hava ön ısıtıcısı 1922 yılında Frederick Ljungstrom tarafından gerçekleştirilmiştir.

Sabit matrisli bir rejeneratörde ısı enerjisinin depolanması ile ilgili ilk teorik analizler 1926' da Anzelius, 1927' de Nusselt , 1927-1929' da Hausen ve 1929' da Schmann tarafından yapılmıştır. Bu araştırmacılar aşağıdaki durumları ele alarak problemi kuramsal yöntemle incelemişlerdir (Jakop, 1957).

1. Isıtma ve soğutma periyotlarının uzunluğu sonsuz küçüktür. Yani, rejeneratör sonsuz sıklıkta sıcak ve soğuk akışkan akışına açılıp kapanmaktadır. Bu varsayım dönel rejeneratörler için sonsuz büyük dönme

hızlarıyla ilgilidir.

2. Katının ısı iletkenliği sonsuz büyüktür.

3. Katının ısı iletkenliği, gaz akışına paralel yönde sonsuz büyük ve gaz akışına dik yönde sonludur.

4. Katının ısı iletkenliği gaz akışına paralel yönde sıfır ve gaz akışına dik yönde sonsuz büyüktür.

5. Katının ısı iletkenliği gaz akışına paralel yönde sıfır ve gaz akışına dik yönde sonludur.

Bu durumlardan, birincisi Nusselt ve Hausen tarafından araştırılmıştır. Hausen; birinci maddede belirtilen rejeneratör etkinliğinin karşı akışlı reküperatör tip ısı değiştiricileri ile aynı olduğunu göstermiştir. İkinci durum Nusselt tarafından araştırılmıştır. Nusselt' in hesaplamaları; bu rejeneratör tipinin performansının oldukça düşük olacağını göstermiştir. Birinci, ikinci ve üçüncü durumlar için geçerli rejeneratör denklemlerinin çözümlerini elde etmek o kadar zor değildir. Ancak bu durumların pratikteki endüstriyel uygulamaları sınırlıdır.

Dördüncü durum, oluklu uzun ve ince metal levhalardan yapılan rejeneratörleri temsil etmektedir. Metal duvarların kalınlığı çok küçük olduğundan, ısı iletkenlik oldukça yüksektir. Gaz akışına dik yönde Biot sayısı çok küçüktür. Böylece, metalin ısı iletkenliğinin bu yönde sonsuz büyük olduğu kabul edilebilir. Ancak uzunlamasına ısı iletimi için rejeneratör boyu çok büyük ve kesit alanı yeterince küçük olduğundan, gaz akışına paralel yönde duvarın ısı iletkenliği sıfır kabul edilebilir. Beşinci durum; refrakter tuğlalardan yapılan sabit matrisli rejeneratörleri ve

cam-seramik malzemelerden yapılan dönel rejeneratörleri kapsamaktadır. Maalesef dördüncü ve beşinci durumlar için rejeneratör denklemlerinin analitik çözümleri; diferansiyel denklemleri basitleştirmek için yapılan çok sayıda varsayımlarla bile oldukça zordur. Yeterli sayıda basitleştirme varsayımları kullanılmaksızın rejeneratör probleminin kapalı çözümünü elde etmek mümkün olmamıştır.

Dördüncü durum, Anzelius, Nusselt, Hausen ve Schmann tarafından ayrı ayrı araştırılmıştır. Bu araştırmacılar dördüncü duruma ilaveten aşağıdaki varsayımları da yaparak bir rejeneratörün geçici rejimdeki davranışını araştırmışlardır. Bu varsayımlar şöyledir.

1. Akışkan ve matris malzemesinin özgül ısıları, sıcaklıktan bağımsızdır.
2. Akışkan ile matris malzemesi arasındaki ısı taşınım katsayıları sabittir.
3. Giren akışkan sıcaklığı, akış giriş kesiti boyunca üniformdur ve zamanla değişmemektedir.
4. Matris sıcaklığı, akışkan akmaya başlarken üniformdur. Bu varsayım sadece Anzelius ve Schmann tarafından yapılmıştır.
5. Matristeki gazların ısı kapasitesi, duvarın ısı kapasitesine nazaran ihmal edilebilir.

Anzelius ve Nusselt gaz ve duvar sıcaklıklarını dördüncü varsayım için integral formda vermişlerdir. Fakat bunları çözmemişlerdir.

Nusselt, sadece tek yönlü akış için elde ettiği sonuçları kullanarak

dördüncü varsayım için periyodik işlem teorisini geliştirmiştir. Sıcak akışkanın akış periyodları, ısı taşınım katsayıları ve kapasite oranlarını soğuk akışkanınkilere eşit almıştır. Bu integral denklemlerini çözmek için bazı yaklaşık yöntemlerin kullanılması yoluna gidilmiştir.

Hausen, grafik yöntem kullanarak dördüncü varsayım için periyodik akış rejeneratör denklemlerine yaklaşık bir çözüm bulmuştur.

Coppage ve London (1953), rejeneratörleri analiz etmek için, reküperatör tip ısı değiştiricilerine uygulanana benzer bir $\epsilon-N_{tu,0}$ yöntemini önermişlerdir. Prensipde, periyodik akış tipi rejeneratörlerin avantajları kısaca açıklanmış ve rejeneratör performans analizinin matematiksel zorlukları ifade edilmiştir. Bu araştırmacılar; Hausen ve Nusselt' in çözümlerini $\epsilon-N_{tu,0}$ yönteminin boyutsuz parametrelerini kullanarak yeniden değerlendirmişlerdir.

Harper ve Rohsenow (1953), dönele rejeneratör performansının gaz türbini tesis performansına etkisini araştırmışlar ve sızıntıların rejeneratör etkinliğine etkisini göstermişlerdir.

Lambertson (1958), periyodik akışlı ısı değiştiricilerinin performansını araştırmıştır. Bu araştırmacı Dusinberre (1961), tarafından teklif edilen sonlu farklar tablosunu kullanmıştır. Sonlu fark denklemlerini yazarak dönele bir rejeneratörün etkinliğini sayısal olarak

hesaplamıştır. Ancak rejeneratörlerin ilgili kısmi türevli denklemleri gözönüne alınmamıştır. Lambertson, aritmetik ortalama sıcaklıkları kullanmış ve Anzelius, Nusselt, Hausen ve Schmann tarafından kendi analizlerinde kullanılan aynı varsayımları yapmıştır. Bunlar,

1. Matrisin ısı iletkenliği, akışkan akışı yönünde sıfır ve akışkan akışına dik yönde sonsuzdur.

2. Sıcak ve soğuk akışkanın ve matris malzemesinin özgül ısıları sıcaklıkla değişmez.

3. Akışkanların birbirine karışımı yoktur.

4. Akışkan ile matris arasındaki ısı taşınım katsayıları sabittir.

5. Giren akışkan sıcaklığı, akış giriş kesitinde üniformdur ve zamanla değişmez.

6. Bütün matris elemanları için periyodik şartlar belirlenmiştir.

Kays ve London (1964), $Cr/Cmin$ 'in $\epsilon < 90$ için dönele bir rejeneratörün etkinliğine etkisi için aşağıdaki ampirik bağıntıyı vermiştir.

$$\epsilon = \epsilon_r [1 - 1/(9 (Cr/Cmin)^{1.93})]$$

ϵ_r : Karşı akışlı reküperatörün etkinliği (-)

$Cr/Cmin$: Matris malzemesi ile düşük ısı kapasiteli akışkanın kapasite debileri oranı (-)

London (1964), aksenele ısı iletiminin; etkinliğe etkisini araştırmış

ve yaklaşık olarak eşit olan akışkan kapasite oranları için, aşağıdaki şekilde bir etkinlik düzeltme faktörü önermiştir.

$$\frac{\Delta \epsilon}{\epsilon} \cong \frac{k A_{cr}}{L C_{min}}$$

$\Delta \epsilon$: Etkinliğin azalması (-)

k : Matris malzemesinin ısı iletkenliği (W/mK)

A_{cr} : Boyuna ısı iletimi için duvar kesit alanı (m²)

L : Aksenal yöndeki rejeneratör boyu (m)

London, Sampson ve Gowan (1964), bir gaz türbini tesisi ısı değiştiricilerinin geçici rejim davranışını araştırmışlardır (London, 1964). Giriş sıcaklıklarından birinin adım girişinin değişmesinden kaynaklanan, karşıt akışlı bir gaz türbini rejeneratörünün çıkış akışkan sıcaklıklarının geçici rejim davranışı için yapılan çözümler, boyutsuz grafiklerde gösterilmiştir. Bu çalışmalarımda akışkanların kapasite oranı (C_{min}/C_{max})=1 olduğu durumu ele almışlardır. Parametrelerin etkinlik ve çıkış sıcaklığı üzerindeki etkilerini tartışmışlar ve akışkan sıcaklığı geçici davranışını incelemek için aşağıdaki ifadeyi kullanmışlardır.

$$\epsilon_f^* = \frac{T_{f,o}(t_f) - T_{f,o}(t_f=0)}{T_{f,o}(t_f=\infty) - T_{f,o}(t_f=0)}$$

$T_{f,o}$: Sıcak veya soğuk akışkanın çıkış sıcaklığı (K)

$t_f=\infty$: Peryodik çalışma şartları (-)

Bu araştırmacılar; rejeneratörlerin sıcaklığa tepkilerinin, reküperatör tipli ısı değiştiricilerine göre daha hızlı olduğunu gözlemişlerdir.

Willmott (1969), sabit matrisli rejeneratörlerin analizi için bir yöntem önermiştir. Bu araştırmacı, Hausen tarafından verilen boyutsuz parametreleri ve denklemleri kullanmıştır.

Atthey (1968), rejeneratif bir ısı değiştiricisinin yaklaşık ısı analizini araştırmıştır. Kullanılan yaklaşımlar, azalan periyodlar olarak bilinen boyutsuz parametrelerin çok büyük olmaması gerçeğine dayandırılmıştır. Yöntem, zamana göre ortalama çıkış sıcaklıklarını vermektedir. Bunlar Hausen tarafından eşdeğer bir analizden elde edilen değerlere eşittir. Ayrıca akışkan ve matris sıcaklıklarının pozisyon ve zamanla değişimini de belirlemektedir.

Romie (1990), dönel rejeneratör çıkış gaz sıcaklığının, kütle hızlarındaki kademe değişimlerine karşı davranışını araştırmıştır. İlgili denklemler lineer ve homojendir. Analiz edilen rejeneratör, aşağıdaki idealleştirmelerle incelenmiştir.

1. Matris içerisinde akışkan akışı yönünde ısı iletimi ihmal edilmiştir.

2. Matris içerisinde herhangi bir anda akışkanın ısı kapasitesi matrisin ısı kapasitesine oranla ihmal edilebilecek derecede küçüktür ve sıfır olarak alınmaktadır.

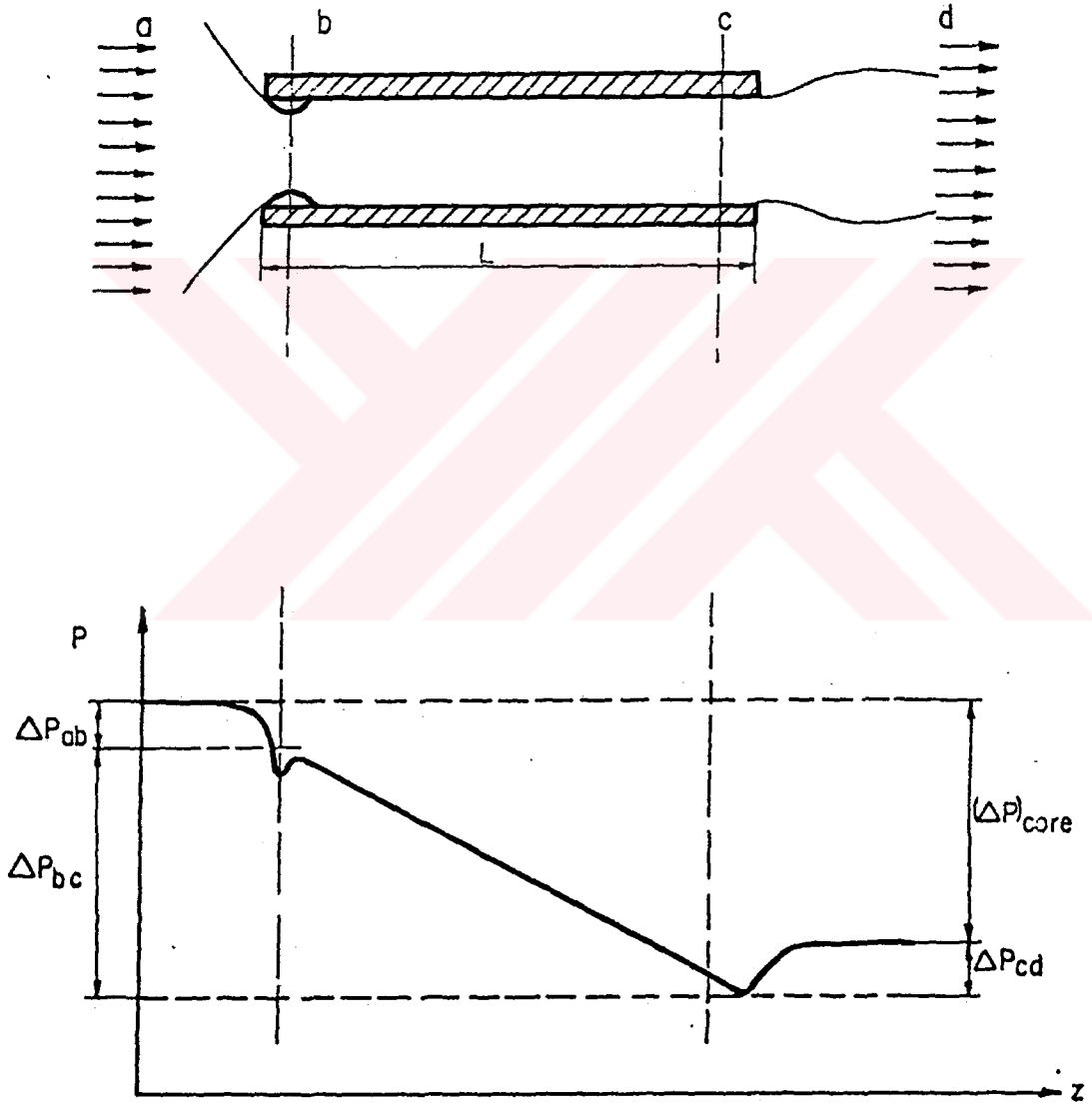
Hill ve Willmott (1987), ısıt rejeneratör davranışını açıklayan kısmi türevli denklemlerin çözümü için araştırma yapmışlardır. Uygulanan yaklaşım yöntemi Razelos tarafından verilene benzerdir. Fakat bu yaklaşım yönteminin doğruluğunu ve özellikle sayısal kararlılığını sağlamada trapez kuralı kullanılmıştır. Araştırmacılar, rejeneratör davranışının modelini veren kısmi türevli denklemlere, aşağıdaki basitleştirme ve varsayımları uygulamışlardır.

1. Geri dönme periyotları esnasında matris kanallarındaki atık akışkanın etkileri ihmal edilmektedir.
2. Akışkanlar ile matrisin ısıt iletkenliği, akışa paralel yönde sıfırdır.
3. Radyal yöndeki katı sıcaklık dağılımı ele alınmamıştır.
4. Akışkan ve matrisin ısıt transfer katsayısı ve ısıt özellikleri, sıcaklıktan bağımsız olarak değerlendirilmektedir.
5. Her periyoddaki akışkanın kütleli debisi zamana göre değişmemektedir. Fakat sıcak ve soğuk periyotlarda farklı olabilir.

Bu araştırmada trapez kuralının kullanılması; rejeneratör modeli için kararlı bir çözüm vermektedir. Sonuçlardan; bu yöntemin Razelos tarafından verilen yöntemle oranla, modelin hassas bir çözümünü hesaplamak için gerekli bilgisayar zamanında önemli oranda azalmayı sağladığı da görülmüştür.

2. BASINÇ KAYIPLARININ HESABI

Matrisin tek bir kanalından geçen akış, şematik olarak Şekil 2.1' de gösterilmiştir (Kays, 1950).



Şekil 2.1: Matris Kanalı Boyunca Basınç Kaybı

Gazların hız dağılımının kanal girişinde üniform olduğu kabul edilebilir. Viskoz kuvvetlerden dolayı kanalda, sürtünme basınç kaybı vardır. Sıcak ve soğuk periyotlar esnasında matriste oluşan ısıtma veya soğutmanın neticesi olarak, akışkanın yoğunluk ve ortalama hızı kanal boyunca değişir. Rejeneratörün sıcak veya soğuk tarafındaki toplam basınç kaybı aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$\Delta P_f = \Delta P_{ab} + \Delta P_{bc} + \Delta P_{cd} \quad (2.1)$$

Tersinir serbest genişmeden dolayı basınç kaybı yoksa, yukarıdaki denklemin sağ tarafındaki ilk terim, Bernoulli denkleminde şu şekilde hesaplanır.

$$\Delta P_{ab} = P_a - P_b = \frac{\rho_a (U_b^2 - U_a^2)}{2} \quad (2.2)$$

P_a : Kanal girişinden önce akışkanın basıncı, (Pa)

P_b : Şekil 2.1' de, b noktasındaki akışkan basıncı, (Pa)

U_a, U_b : Şekil 2.1'de, sırasıyla a ve b noktalarındaki akışkan hızları, (m/s)

Gerçek durumda

$$K_c \frac{U_b^2 \rho_a}{2} \quad (2.3)$$

ye eşit bir basınç kaybı oluşur. Burada, K_c ani daralma basınç kayıp katsayısıdır.

(2.2) denklemi aşağıdaki şekilde yeniden yazılabilir.

$$\frac{\rho_a U_b^2 [1 - (A_0/A_{fr})^2]}{2} \cong \frac{G_f^2}{2\rho_a} (1 - \sigma^2) \quad (24)$$

G_f : Akışkanın kütleli akışı, ($\text{kg}/\text{m}^2 \text{ s}$)

$$G_f \cong \frac{m_f}{A_0} \quad (25)$$

A_0 : Serbest akış kesit alanı, (m^2)

σ : Matrisin gözenekliliği ($\sigma = A_0/A_{fr}$), (-)

Gerçek durumda ΔP_{ab} (ρ_a yerine $\rho_{f,i}$ olarak) şu şekli alır.

$$\Delta P_{ab} = \frac{G_f^2}{2\rho_{f,i}} (1 - \sigma^2) + K_c \frac{G_f^2}{2\rho_{f,i}} = (1 - \sigma^2 + K_c) \frac{G_f^2}{2\rho_{f,i}} \quad (26)$$

Benzer şekilde, çıkışta Bernoulli denklemi kullanılarak ΔP_{cd} yaklaşık olarak denklem (2.7) deki gibi yazılabilir.

$$\Delta P_{cd} = P_c - P_d \cong \frac{\rho_d (U_d^2 - U_c^2)}{2} = \frac{\rho_d U_c^2 \left[\left(\frac{U_d}{U_c} \right)^2 - 1 \right]}{2} \cong \frac{G_f^2}{2\rho_d} (\sigma^2 - 1) \quad (27)$$

Burada, ρ_d ve U_d sırasıyla Şekil 2.1' de, akışkanın d noktasındaki yoğunluk ve hızıdır. Gerçek durumda, ani genişlemeden dolayı da bir basınç

kayıbı vardır ve

$$\frac{K_e G_f^2}{2 \rho_d} \quad (28)$$

ile ifade edilebilir. Burada, K_e ani genişleme basınç kayıp katsayısıdır.

ΔP_{cd} (ρ_d yerine $\rho_{f,o}$ kullanılarak) şu şekilde yazılabilir.

$$\Delta P_{cd} = (\sigma^2 - 1 + K_e) \frac{G_f^2}{2 \rho_{f,o}} \quad (29)$$

Tam gelişmiş hidrolik sınır tabaka için, sürtünme basınç kaybı

$$f_f \frac{L}{r_{hyd}} \frac{G_f^2}{2 \rho_{f,m}} \quad (2.10)$$

değerine eşittir. Burada, r_{hyd} akış kesitinin ıslatılan çevreye oranı olarak tanımlanan hidrolik yarıçap, $\rho_{f,m}$ akışkanın ortalama yoğunluğu ve " f_f " Fanning sürtünme katsayısıdır.

$$r_{hyd} = \frac{A_o}{A/L}, \quad \frac{1}{\rho_{f,m}} = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{\rho_{f,i}} + \frac{1}{\rho_{f,o}} \right) \quad (2.11)$$

Akışkan hızlanmasından veya yavaşlamasından dolayı basınç farkı, momentum denklemi kullanılarak ifade edilebilir.

$$m_f U_c - m_f U_b = A_o \Delta P_{mc} \Rightarrow \Delta P_{mc} = \frac{m_f U_c - m_f U_b}{A_o} \quad (2.12)$$

Ayrıca,

$$U_b \cong \frac{m_f}{\rho_{f,i} A_o} \quad , \quad U_c \cong \frac{m_f}{\rho_{f,o} A_o}$$

$$\Delta P_{mc} = \left(\frac{m_f}{A_o} \right)^2 \left(\frac{1}{\rho_{f,o}} - \frac{1}{\rho_{f,i}} \right) \text{ veya } \Delta P_{mc} = G_f^2 \left(\frac{1}{\rho_{f,o}} - \frac{1}{\rho_{f,i}} \right) \quad (2.13)$$

yazılabilir.

(2.6), (2.9), (2.10) ve (2.13) denklemlerini, (2.1) denkleminde yerine koyarak, rejeneratör matrisinin giriş ve çıkışı arasındaki toplam basınç farkı elde edilir.

$$\Delta P_f = \frac{G_f^2}{2 \rho_{f,i}} \left[(1 - \sigma^2 + K_c) + f_f \frac{L}{\Gamma_{hyd}} \frac{\rho_{f,i}}{\rho_{f,m}} + 2 \left(\frac{\rho_{f,i}}{\rho_{f,o}} - 1 \right) + (\sigma^2 + K_e - 1) \frac{\rho_{f,i}}{\rho_{f,o}} \right] \quad (2.14)$$

Giriş basınçlarının oranı olarak (2.15) denklemi elde edilir.

$$\frac{\Delta P}{\rho_{f,i}} = \frac{G_f^2}{2 \rho_{f,i} \rho_{f,i}} \left[(1 - \sigma^2 + K_c) + f_f \frac{L}{\Gamma_{hyd}} \frac{\rho_{f,i}}{\rho_{f,m}} + 2 \left(\frac{\rho_{f,i}}{\rho_{f,o}} - 1 \right) + (\sigma^2 + K_e - 1) \frac{\rho_{f,i}}{\rho_{f,o}} \right] \quad (2.15)$$

(Yukarıdaki denklemlerde "f" indisi yerine sıcak veya soğuk akışkanlar için, sırasıyla "H" veya "c" kullanılmaktadır).

Giriş ve çıkış basınç kayıp katsayıları (K_c ve K_e); Şekil 2.2 ve 2.3 den, gözeneklilik ve Reynolds sayısının bir fonksiyonu olarak alınabilir. Rejeneratör matrisleri için hidrolik çaplar çok küçük (0.5-3 mm) olduğundan, matris kanellerindeki akış rejimleri laminer olur (Kays, 1964).

2.1. Dönel Rejeneratör Matrisleri İçin Sürtünme ve Colburn Faktörleri

İkinci bölümde bahsedildiği gibi, "f" (2.10) denklemindeki Fanning sürtünme faktörüdür. Bu faktör, birim alandaki duvar kayma gerilmesinin birim hacimdeki akış kinetik enerjisine oranı olarak tanımlanmaktadır.

$$f_f \equiv \frac{\tau_w}{\frac{1}{2} \rho U_{fm}^2} = \frac{\Delta P_{fric.}}{2 \frac{L}{D_{hyd}} \rho U_{fm}^2} \quad (2.16)$$

τ_w : Duvardaki (matris yüzeyi) kayma gerilmesi, (Pa)

U_{fm} : Akışkan ortalama aksenal hızı, (m/s)

D_{hyd} : Akışkan kanallarının hidrolik çapı, (m)

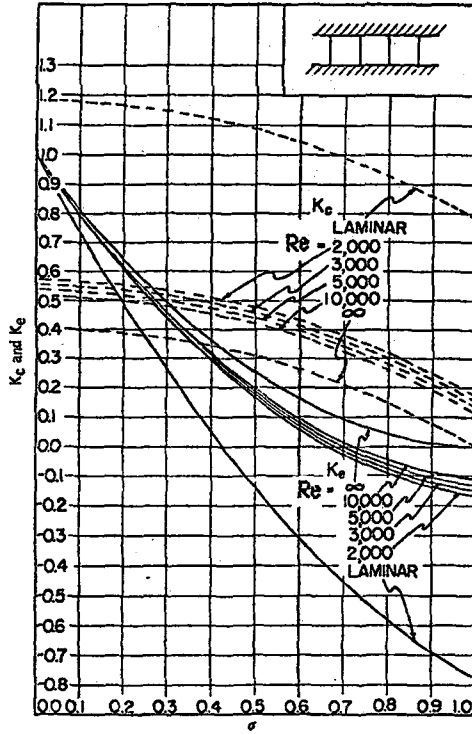
$$D_{hyd} \equiv \frac{4A_o}{A/L} = \frac{4\sigma}{\beta} \quad (2.17)$$

L : Matrisin boyu, (m)

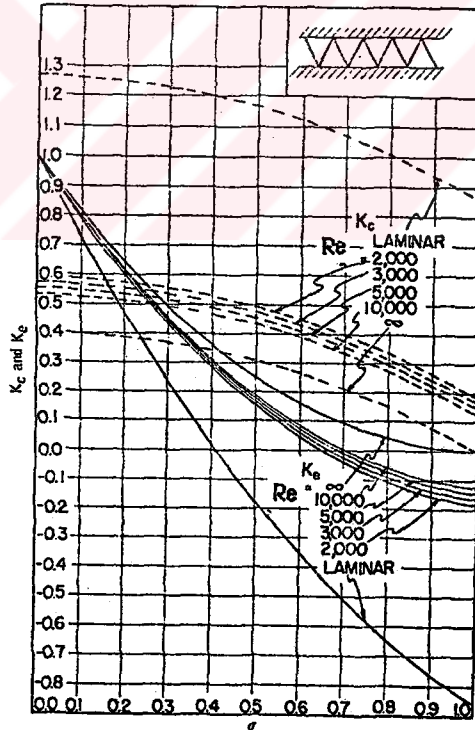
β : Yüzey alanı yoğunluğu, (m^2/m^3)

$$\beta \equiv \frac{A}{V} = \frac{A}{A_{fr} L} \quad (2.18)$$

Sürtünme faktörü "f", laminar akışta, Reynold sayısına, L/D_{hyd} oranına ve matrisin kanal geometrisine bağlı olup yüzey pürüzlülüğünden etkilenmez.



Şekil 2.2: Kare Kanallar için Giriş ve Çıkış Basınç Kayıp Katsayısı



Şekil 2.3: Üçgen Kesitli Kanallar için Giriş-Çıkış Basınç Kayıp Katsayısı

Dönel rejeneratörlerde deneysel olarak kullanılan farklı matris geometrileri için, Fanning sürtünme faktörü, izotermal basınç kaybı verilerinden (yani, matris duvarından hiç ısı transferi olmaması durumundan) belirlenmekte ve Reynolds sayısının bir fonksiyonu olarak ifade edilmektedir. Üçgen veya dikdörtgen şeklindeki sürekli düz kanallar olan dönel rejeneratörlerde, sık sık kullanılan yüzey geometrileri için "f" değerleri Şekil 2.4, 2.5, 2.6 ve 2.7 'de verilmektedir. Bu şekillerden elde edilen sürtünme faktörleri; depo tipi ısı değiştiricilerinde, akışkan ile duvar arasında sıcaklık farkı oluşmasından dolayı düzeltilmelidir. Bu düzeltme, aşağıdaki bağıntı kullanılarak yapılabilir (Kakaç ve Yener, 1980).

$$\frac{f_f}{f_{f,ct}} = \left(\frac{\bar{T}_w}{T_{f,m}} \right)^m \quad (2.19)$$

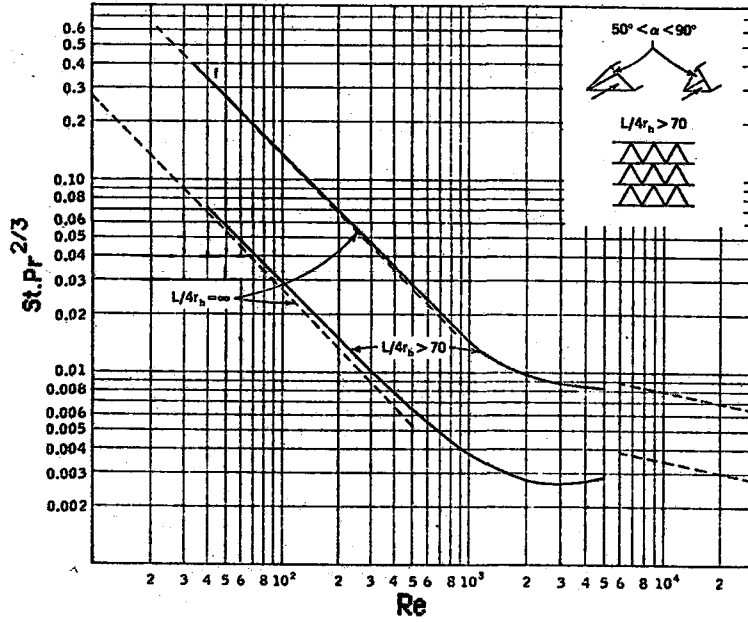
$f_{f,ct}$:Şekil 2.4, 2.5, 2.6 ve 2.7 'den, farklı kanal geometrileri için elde edilebilen ortalama yığışik sıcaklığındaki sabit fiziksel özellikler durumunda Fanning sürtünme faktörü, (-)

\bar{T}_w :Ortalama duvar sıcaklığı, (K)

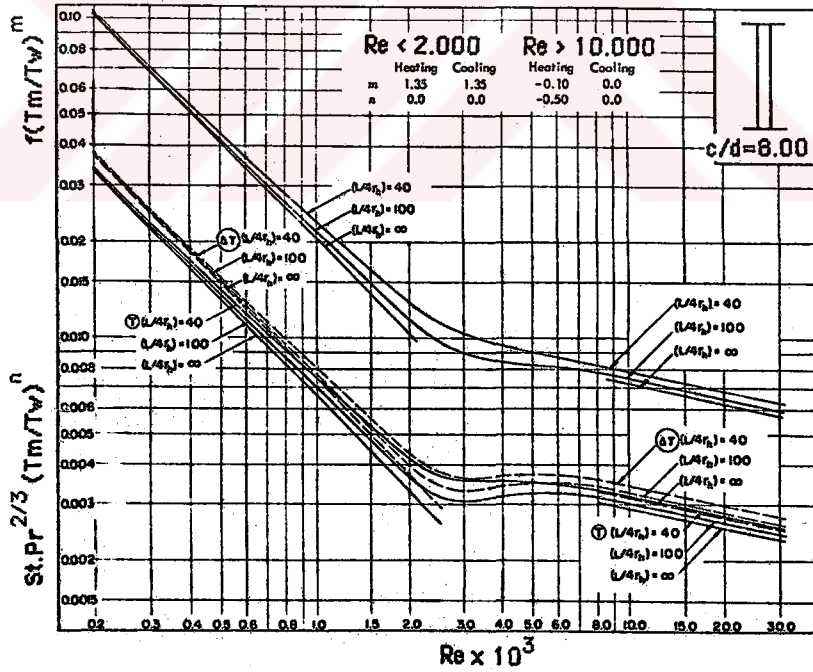
$T_{f,m}$:Ortalama akışkan sıcaklığı, (K)

$T_{f,m}$ ve \bar{T}_w sıcaklıkları, aşağıdaki ifadeler kullanarak hesaplanabilir.

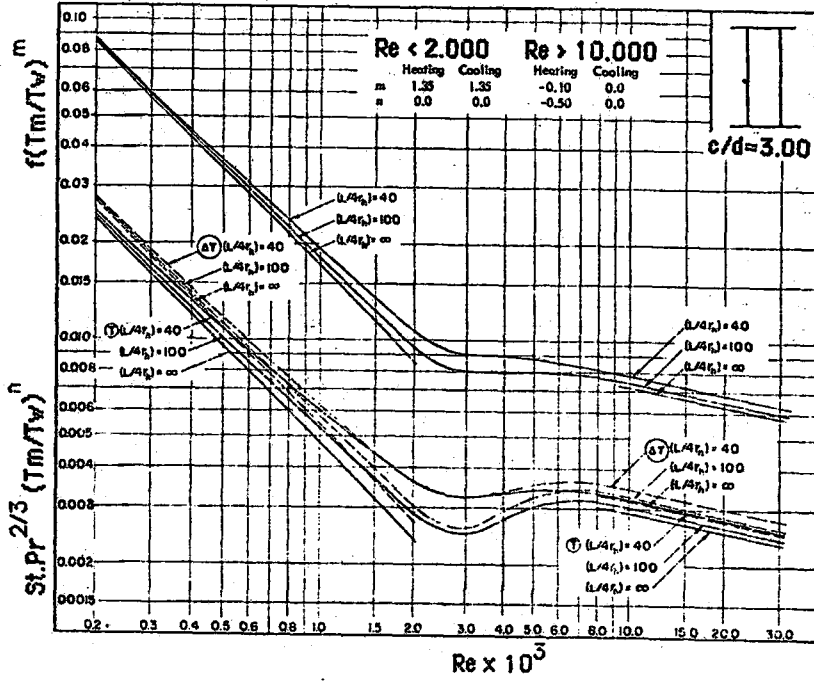
$$T_{f,m} = \frac{T_{f,i} + \bar{T}_{f,o}}{2}, \quad \bar{T}_w = \frac{\bar{T}_{H,o} + (hA)^* \bar{T}_{c,o}}{1 + (hA)^*} \quad (2.20)$$



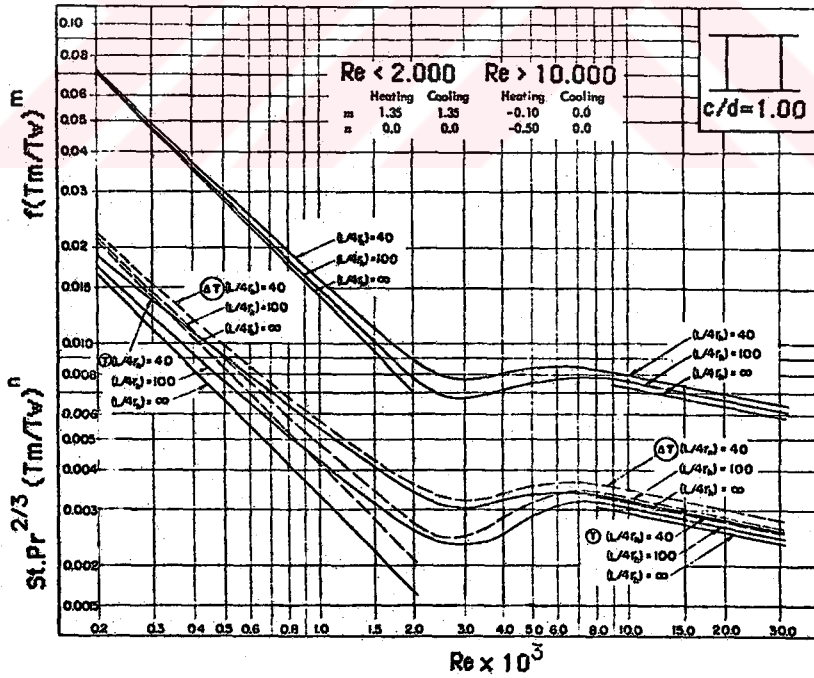
Şekil 2.4: Üçgen Kanallar İçin Fanning Sürtünme ve Colburn Faktörleri ($L/r_{hd} = \infty$)



Şekil 2.5: Dikdörtgen Kanallar İçin Fanning Sürtünme ve Colburn Faktörleri (c/d = 8)



Şekil 2.6: Dikdörtgen Kanallar İçin Fanning Sürtünme ve Colburn Faktörleri (c/d = 3)



Şekil 2.7: Kare Kanallar İçin Fanning Sürtünme ve Colburn Faktörleri (c/d = 1)

"m" üssünün değeri Şekil 2.6 ve 2.7' de verilmektedir. Dairesel boru kanalları için "m" değeri aşağıdaki gibi olur (Kays ve London, 1964).

$$m=1.00 \text{ (Soğuk peryod ve } 1 < T_w/T_{c,m} < 3 \text{)}$$

$$m=0.81 \text{ (Sıcak peryod ve } 0.5 < T_w/T_{H,m} < 1 \text{)}$$

Şekil 2.5, 2.6 ve 2.7 ' den, dairesel olmayan farklı kanal geometrileri için de, "m" değeri yaklaşık olarak kullanılabilir.

Colburn faktörü " J_f " şu şekilde tanımlanmaktadır.

$$J_f \equiv St_f Pr_f^{2/3} \quad (2.21)$$

Burada St_f Stanton sayısını ifade etmektedir. Stanton sayısı akışkanın ortalama yığılık sıcaklığı için tesbit edilmelidir.

$$St_f = \frac{h_f}{G_f c_{p,f}} = \frac{Nu_f}{Pr_f Re_f} = \frac{Nu_f}{Pe_f} \quad (2.22)$$

h_f : Akışkan ile duvar arasındaki ısı taşınım katsayısı, ($W/m^2 K$)

G_f : Akışkanın kütleli akışı, ($kg/m^2 s$)

$c_{p,f}$: Akışkanın özgül ısısı, ($J/kg K$)

Nu_f : Nusselt sayısı, (-)

$$Nu_f = \frac{h_f}{k/D_{hyd}} \quad (2.23)$$

Nusselt sayısı, laminer akışta ısı sınır şartlarına ve akış kanalı geometrisine bağlıdır. Isıl ve hidrodinamik olarak tam gelişmiş laminer akış için sabittir. Prandtl sayısı, ortalama film sıcaklığı için tesbit edilmelidir.

$$Pr_f \equiv \frac{\nu_f}{\alpha_f} = \frac{\mu_f C_{p,f}}{k_f} \quad (2.24)$$

ν_f : Akışkanın kinematik viskozitesi, (m^2/s)

α_f : Akışkanın ısı yayılma kapasitesi, (m^2/s)

μ_f : Akışkanın dinamik viskozitesi, (Pa s)

k_f : Akışkanın ısı iletim katsayısı, (W/m K)

Akışkan ve matris duvarı arasında hiç ısı transferi olmaması durumu için, $J_{ct,f}$ -Re değerleri Şekil 2.4, 2.5, 2.6 ve 2.7 'den alınabilir. J_{ct} değerleri; $0.5 < Pr < 10$ aralığında akışkan özellikleri ile çok fazla değişmez.

London ve Stang (1970), $40 < Re < 800$ değerleri arasında üçgen kanallardan gaz akışı için, aşağıdaki bağıntıları vermektedir.

$$f_{ct,f} = 14.0/Re_f \quad , \quad J_{ct,f} = 3.0/Re_f \quad (2.25)$$

London ve Shah (1973), $80 < Re < 800$ değerleri arasında hegzagonal kanallardan gaz akışı için, aşağıdaki bağıntıları vermektedir.

$$f_{ct,f} = 17.0/Re_f \quad , \quad J_{ct,f} = 4.0/Re_f \quad (2.26)$$

Akışkan ortalama yığışik sıcaklığı ile duvar ortalama sıcaklığı arasında bir fark olduğundan, Şekil 2.4, 2.5, 2.6 ve 2.7 ' den elde edilen J_{ct} değerleri, gerçek Colburn faktörünü bulmak için aşağıdaki bağıntı kullanılarak düzeltilmelidir.

$$\frac{J_f}{J_{ct,f}} = \left(\frac{\bar{T}_w}{T_{f,m}} \right)^n \quad (2.27)$$

$J_{ct,f}$: Şekil 2.4, 2.5, 2.6 ve 2.7 ' den elde edilen ortalama yığışik sıcaklığındaki sabit özellik Colburn faktörü (-)

T_w : Ortalama duvar sıcaklığı, (K)

$$\bar{T}_w = \frac{\bar{T}_{H,m} + (hA)^* \bar{T}_{c,m}}{1 + (hA)^*} \quad (2.28)$$

$T_{f,m}$: Ortalama akışkan sıcaklığı, K

$$T_{f,m} = \frac{T_{f,i} + \bar{T}_{f,o}}{2} \quad (2.29)$$

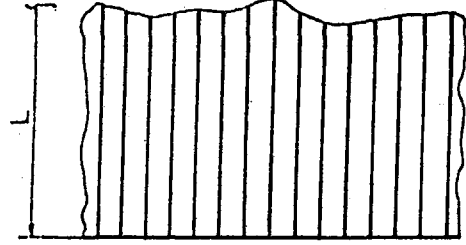
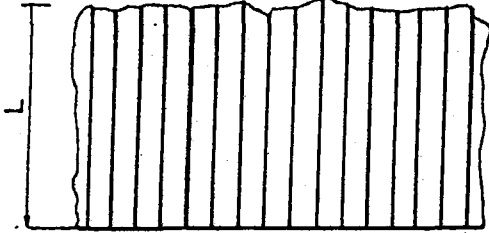
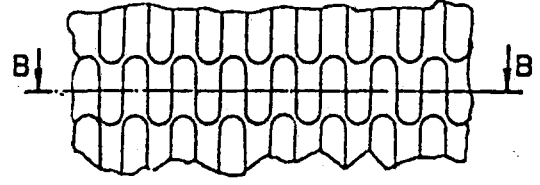
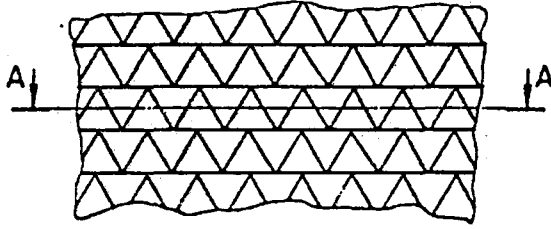
(2.27) denklemindeki "n" üssünün değerleri Şekil 2.5, 2.6 ve 2.7' de verilmektedir. Laminer akış için sıfırdır.

2.2. Dönel Rejeneratörlerin Matris Yüzey Geometrileri

Birinci bölümde bahsedildiği gibi, dönel rejeneratörler kompakt ısı değiştiricileridir. Kompakt ısı değiştiricileri için, yüzey alan yoğunluğu β ; $700 \text{ m}^2/\text{m}^3$ ten büyüktür. Üretim zorluklarından dolayı, oluklu metal levhalardan yapılmış matrisler için, yüzey alan yoğunluğu $5500 \text{ m}^2/\text{m}^3$ ten büyük olamaz. Metal tellerin matris olarak kullanılmasıyla, yüzey alan

yoğunluğunu $7000 \text{ m}^2/\text{m}^3$ e kadar artırmak mümkündür. Ayrıca, cam-seramik malzemelerin kullanılmasıyla, $4000-6500 \text{ m}^2/\text{m}^3$ lük yüzey alanı yoğunlukları olan laminar bir matris elde edilebilir (Kays ve London, 1964).

Atık-ısı geri kazanma uygulamaları için, sıcak gaz giriş sıcaklıkları genellikle $500 \text{ }^\circ\text{C}$ ' den azdır. Bu sıcaklığa kadar karbonlu çelik, matris malzemesi olarak kullanılabilir. Sıcak gazların giriş sıcaklıkları $500 \text{ }^\circ\text{C}$ ' den büyükse, matris malzemesi olarak paslanmaz çelik veya seramik kullanılmalıdır. Hidrolik çaplar çok küçük olduğundan, oluklu metal veya seramik levhalardan yapılan matrisler için laminar akış rejimleri elde edilir. Bu matrislerde; oluklu levhalar, halkalar şeklinde rotor kutusuna yerleştirilir. Böylece bitişik levhalar akışkan akışı için küçük kanallar oluştururlar. Bükmeden sonra levhanın şekline bağlı olarak üçgen, dikdörtgen veya sinüsoidal kanallar oluşur (Şekil 2.8). Bu oluklu levhalara "kanatçıklar" denir. Bu terim, ısı transferi sürecini artırmak için normal ısı değiştiricilerinde kullanılan kanatçık kavramıyla karıştırılmamalıdır. Dönel rejeneratörlerde, (şerit kanatçıkları, şerit-dalı kanatçıkları, delik kanatçıkları gibi) kesintiye uğrayan geçit yüzeyleri, sıcak ve soğuk taraflar arasındaki karşılıklı akış sızıntısını önlemek için kullanılmaz. Bu sızıntı, sıcak ve soğuk akışkanların karışmasını ve böylece ısı değiştiricisi etkinliğinin azalmasına sebep olur. Yüzey tipi seçiminde amaç, belli bir basınç kaybı için maksimum Colburn faktörü ve minimum cephe alanını veren yüzey alanını seçmektir. Maksimum Colburn faktörlü ısı değiştiricisi, minimum ısı transferi yüzey alanına sahip olacaktır. Yani toplam hacimde bir azalma olacaktır (Fraas ve Üzışık, 1965).

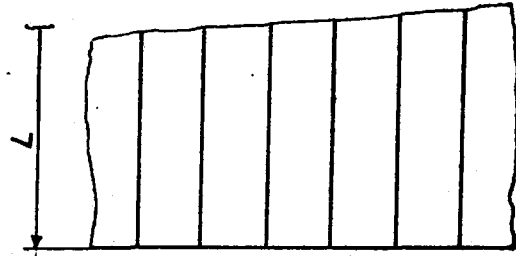
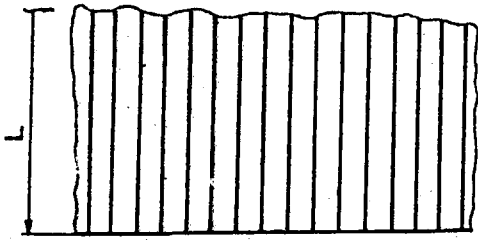
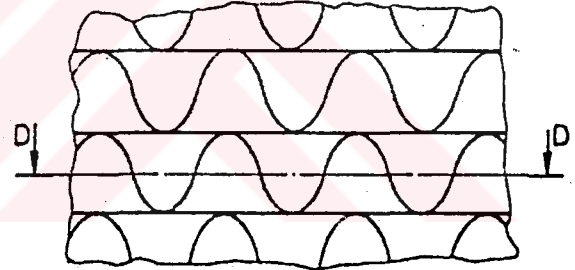
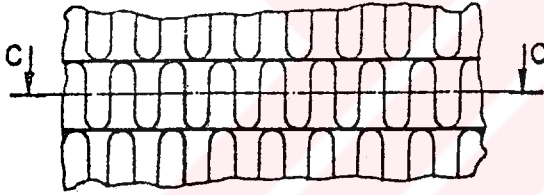


Kesit A-A

Kesit B-B

a. Düz Plaka Kanatcık Yüzeyle
Üçgen Kesitli Düzlem Kanatcık

b. Kanatcık Yüzeyle Dikdörtgen
Kesitli Plaka Kanatcık



Kesit C-C

Kesit D-D

c. Düz Plaka Kanatcık Yüzeyle
Dikdörtgen Kesitli Plaka Kanatcık

d. Düz Plaka Kanatcık Yüzeyle
Sinüs Kesitli Oluklu Kanatcık

Şekil 2.8: Dönel Rejeneratörlerde Kullanılan Matris Yüzey Geometrieleri

(2.14) denkleminde, giriş, çıkış ve artma-azalma etkileri ihmal edilerek,

$$\Delta P_f = \frac{2 f_f L G_f^2}{\rho_{f,m} D_{hyd}} \quad (2.30)$$

yazılabilir.

Tam gelişmiş laminer akış için, Fanning sürtünme faktörünün Reynolds sayısı ile ters orantılı olduğu bilinmektedir.

$$f_f = C/Re_f \quad (2.31)$$

Burada C sabittir. (2.31) denkleminin (2.30) denkleminde yerine konulmasıyla, aşağıdaki denklem elde edilir.

$$\Delta P_f = \frac{2 C L G_f^2}{\rho_{f,m} D_{hyd} Re_f} \quad \text{ve} \quad Re_f = \frac{G_f D_{hyd}}{\mu_f} \Rightarrow \Delta P_f = \left(\frac{2 C \mu_f}{\rho_{f,m} D_{hyd}^2} \right) L G_f$$

veya

$$\Delta P_f = K_f \frac{L m_f}{A_0} \quad (2.32)$$

Böylece, belli bir kütleli debi için basınç kaybı, toplam akış uzunluğu L ile doğru, akış alanı A_0 ile ters orantılıdır.

Isıl olarak tam gelişmiş laminer boru içi akışı için, Nusselt sayısı sabittir. Yani kütle hızından bağımsızdır. Bu nedenle, G_f 'deki bir azalma, Nu_f sayısını azaltmaksızın ΔP_f 'yi azaltacaktır. Dönel rejeneratörlerde basınç kayıplarını azaltmak için G_f 'nin azaltılması gerekir. $G_f = m_f/A_0$ olduğundan basınç kayıplarını azaltmak için cephe alanının artırılması gerekir.

Matris yüzeylerini karşılaştırabilmek için, J_f/f_f olarak bir "alan iyilik faktörü" tanımlanmaktadır (London, 1964).

$$\frac{J_f}{f_f} = \frac{St_f Pr_f^{2/3}}{f_f} = \frac{Nu_f Pr_f^{-1/3}}{f_f Re_f} \quad (2.33)$$

veya (2.30) denklemini kullanarak,

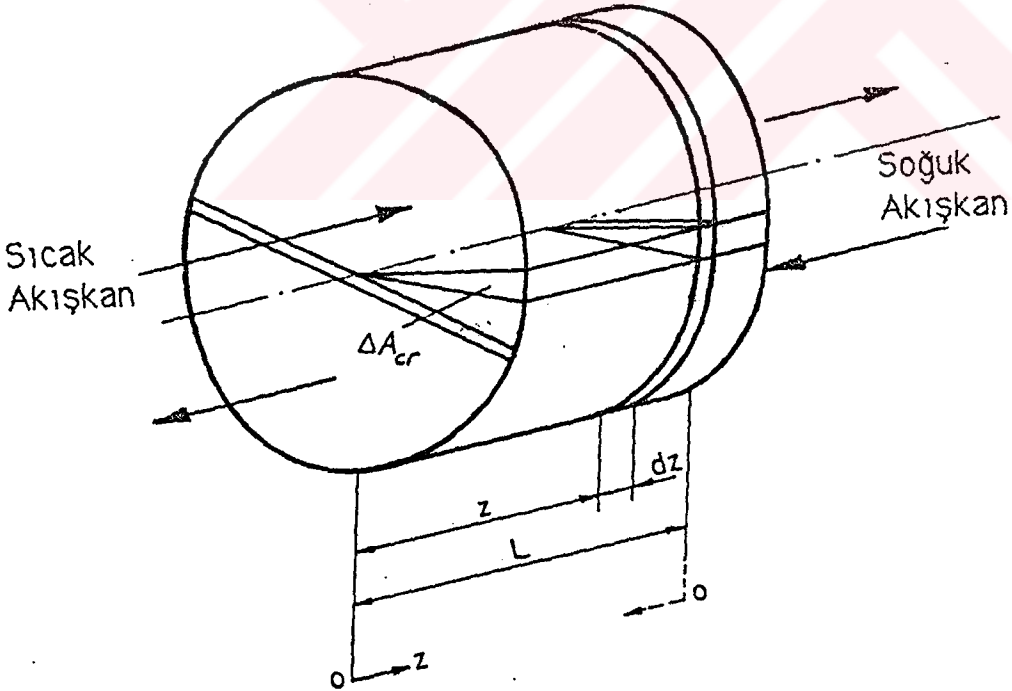
$$\frac{J_f}{f_f} = \frac{1}{A_0^2} \left(\frac{Pr_f^{2/3} N_{tu,f} m_f^2}{2 \Delta P_f P_{f,m}} \right) \quad (2.34)$$

yazılabilir.

$N_{tu,f}$, m_f ve ΔP_f 'nin önceden belirlenmiş değerleri için yukarıdaki denkleme göre, alan iyilik faktörü, A^2 ile ters orantılıdır. Yüksek bir J_f/f_f faktörüne sahip yüzey geometrisi "iyi" dir. Çünkü aynı ısı transferi için daha düşük bir akış alanı gerektirir.

3. REJENERATÖRLERİN MATEMATİKSEL MODELLEMESİ VE SAYISAL ANALİZİ

Birinci bölümde açıklandığı gibi dönel bir rejeneratör, içerisinde sıcak ve soğuk akışkanların ardışık olarak aktığı rejeneratör matrisi denilen silindirik bir paketten oluşmaktadır. Sıcak akışkandan transfer edilen ısı enerjisi, bu pakette çok kısa süre için depolanır. Matrisin sıcak akışkan kanalından soğuk akışkan kanalına dönmesi ile, soğuk akışkanın ısıtılması sağlanır. Soğurma periyodunda, depolanan ısı enerjisi soğuk akışkana transfer edilir. Rejeneratörler genellikle karşıt akış biçiminde çalışırlar. Yani, sıcak akışkanlar, soğuk akışkanların tersi yönünde akarlar.



Şekil 3.1: Matematiksel Analiz İçin Rejeneratör Şeması

3.1. Varsayımlar

Bu bölümde ele alınan matematiksel model için, aşağıdaki varsayımlar yapılacaktır.

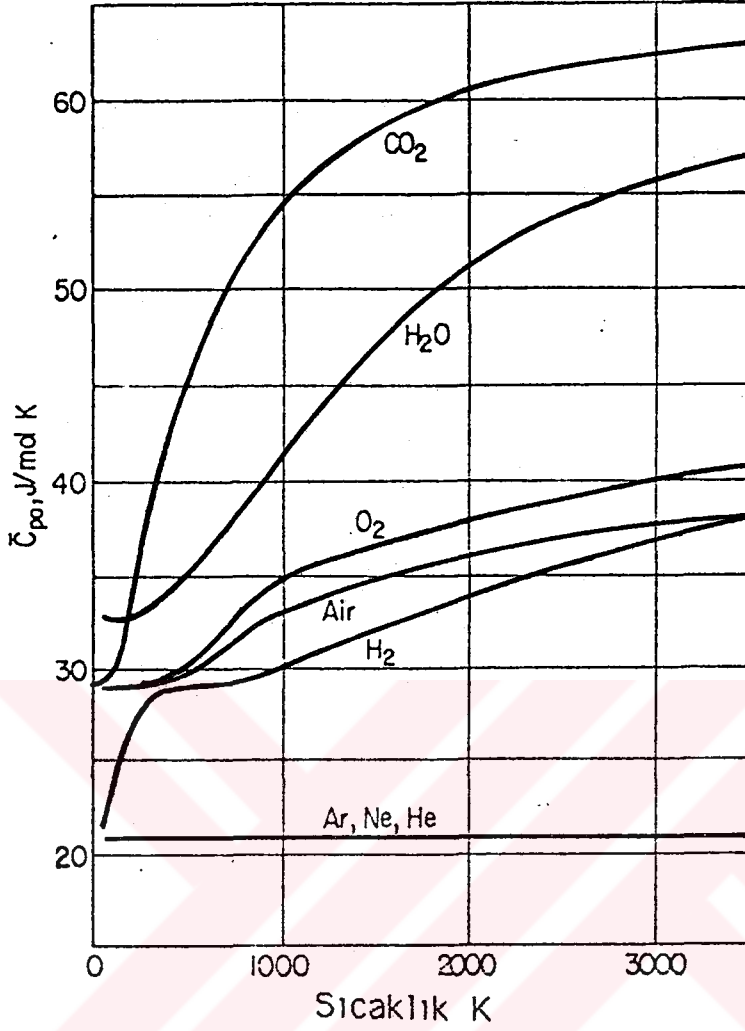
1. Bu çalışmadaki sıcaklık aralığı için akışkanların özgül ısılarının sıcaklıktan bağımsız olduğu varsayılacaktır. Birçok rejeneratör uygulamasında, sıcak akışkan giriş sıcaklığı olan maksimum sıcaklık 500 °C 'den büyük değildir. Şekil 3.2 'de görüldüğü gibi küçük sıcaklık farklarında hava ve diğer birçok gaz için özgül ısı hemen hemen sabittir (Fraas ve Özışık, 1965).

2. Dış yalıtım nedeni ile rejeneratörden dış ortama olan ısı kayıpları ihmal edilecektir.

3. Sıcak ve soğuk akışkanların bünyelerinde bulunan su buharının faz değişikliğine uğramadığı; akışkanların kütleli debilerinin zamanla değişmediği, akışkanların matrisin kanallarına eşit olarak dağıldığı; akışkanların rejeneratöre girişindeki sıcaklıkların zamanla ve pozisyonla değişmediği kabul edilecektir.

4. Matris malzemesi olarak metal malzemeler gözönüne alındığından ve matris kanalcık duvar kalınlığı 1 mm' den az olduğundan (Kanalıcık duvarı içinde $Bi \ll 0.1$) akış doğrultusuna dik yöndeki ısı dirençler sonsuz küçüklükte olduğu kabul edilecek ve radyal yöndeki sıcaklık değişimi ihmal edilecektir.

5. Matris malzemesi için aksenal doğrultudaki ve açısız yöndeki ısı iletimi ihmal edilecektir.

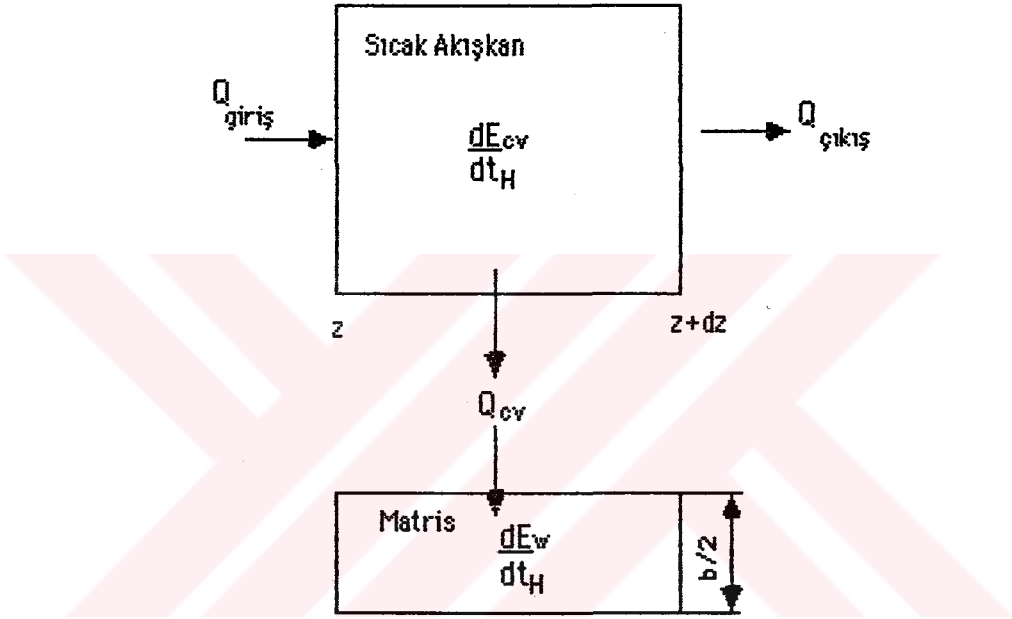


Şekil 3.2: Bazı Gazların Sabit Basınç Özgül Isıları

3.2. İlgili Kısmi Türevli Denklemler

Kısmi türevli denklemler matrisle birlikte dönen gözlemciye göre elde edilecektir. Böyle bir kordinat sisteminde, matris ve akışkan sıcaklıklarının zaman ve eksenel pozisyon olan, iki bağımsız değişkenin fonksiyonları olarak değiştiği gözönünde bulundurulacaktır. Rejeneratörün sıcak tarafını eksenel yönde (Şekil 3.1' de görüldüğü gibi) çok sayıda dilimlere bölerek ve bir dilimin kalınlığını dz alarak, sıcak akışkan için bir

diferansiyel kontrol hacmi elde edilir (Şekil 3.3). Bu kontrol hacmi ve sıcak periyod (matris üzerindeki bir noktanın rejeneratörün sıcak tarafında geçirdiği zaman) için termodinamiğin birinci kanunu aşağıdaki şekilde yazılabilir.



Şekil 3.3: Sıcak Akışkan Tarafı İçin Diferansiyel Elemanlar

Üniform hal-üniform akış süreci için;

$$Q_{cv} + Q_{giriş} = \frac{dE_{cv}}{dt_H} + Q_{çıkış} + W_{cv} \quad (3.1)$$

olur. Burada,

Q_{cv} :Sıcak akışkan elemanından duvar elemanına taşınım yoluyla transfer edilen ısıdır. (W)

$$Q_{cv} = -\frac{(hA)_H}{n} \left(\frac{dz_H}{L} \right) (T_H - T_w) \quad (3.2)$$

h_H :Matris ile sıcak akışkan arasındaki ısı taşınım katsayısı,
(W/m² K)

A_H :Sıcak akışkana maruz kalan toplam ısı transfer alanı, (m²)

L :Rejeneratör matrisinin boyu, (m)

T_H :Sıcak akışkanın sıcaklığı, (K)

T_w :Matris duvarının sıcaklığı, (K)

Z_H :Sıcak akışkan girişinden ölçülen aksel mesafe, (m)

$Q_{giriş}$:Sıcak akışkan ile kontrol hacmine taşınan ısı enerjisi, (W)

$$Q_{giriş} = \frac{m_H}{n} \left(h_i + \frac{U_i^2}{2} + gz_i \right) \quad (3.3)$$

m_H :Sıcak akışkanın kütleli debisi, (kg/s)

h_i :Kontrol hacmin girişinde sıcak akışkanın entalpisi, (J/kg)

g :Yerçekim ivmesi, (m/s²)

z_i :Kontrol hacmin girişinde potansiyel enerji seviyesi, (m)

U_i :Kontrol hacmin girişinde sıcak akışkanın hızı, (m/s)

$Q_{çıkış}$:Kontrol hacminden sıcak akışkan ile taşınan ısı enerjisi, (W)

$$Q_{çıkış} = \frac{m_H}{n} \left(h_e + \frac{U_e^2}{2} + gz_e \right) \quad (3.4)$$

h_e :Kontrol hacmin çıkışında sıcak akışkanın entalpisi, (J/kg)

U_e :Kontrol hacmin çıkışında sıcak akışkanın hızı, (m/s)

z_e :Kontrol hacmin çıkışında potansiyel enerji seviyesi, (m)

Akışkanların kinetik ve potansiyel enerjilerinin değişimleri ihmal edilebilir.

$$Q_{giriş} = \left(\frac{m_H}{n} \right) h_i \quad \text{ve} \quad Q_{çıkış} = \left(\frac{m_H}{n} \right) h_e \quad (3.5)$$

Taylor açılım formülü kullanılarak

$$Q_{çıkış} \cong \left(\frac{m_H}{n} \right) \left(h_i + \frac{dh_i}{dz_H} dz_H \right) \quad (3.6)$$

şeklinde yazılabilir.

W_{cv} :Birim zamanda kontrol hacmi tarafından yapılan iş, (W)

$$W_{cv} = 0 \quad (3.7)$$

E_{cv} :Kontrol hacmindeki akışkanın iç enerjisi, (J)

$$E_{cv} = (\Delta m) e \quad (3.8)$$

Δm_H :Kontrol hacimdeki akışkanın kütlesi, (kg)

$$\Delta m_H = \rho_H \Delta A_{cr} dz_H \quad (3.9)$$

ΔA_{cr} :Akışkan diferansiyel diliminin kesit alanı (Şekil 3.1), (m²)

e_H : Sıcak akışkanın özgül iç enerjisi, (J/kg)

$$e_H = \left(h - \frac{p}{\rho} \right)_H \quad (3.10)$$

P_H : Kontrol hacimdeki sıcak akışkanın basıncı, (Pa)

ρ_H : Kontrol hacimdeki sıcak akışkanın yoğunluğu, (kg/m³)

İdeal akışkan durum denkleminin geçerliliği varsayılarak aşağıdaki eşitlikler yazılabilir.

$$P_H = \frac{P_H}{R_H T_H} \quad \text{ve} \quad e_H = h_H - \frac{P_H R_H T_H}{P_H} \quad (3.11)$$

R_H : Sıcak akışkanlar için gaz sabiti, (J/kg K)

$$\frac{dE_{cv}}{dt} = \frac{d}{dt} \left(\frac{P_H}{R_H T_H} \Delta A_{cv} dz (h_H - R_H T_H) \right) \quad (3.12)$$

Akışkanların entalpileri için referans sıcaklığı sıfır Kelvin alındığı takdirde, sıcak akışkanın entalpisi $C_{p_H} T_H$ olarak yazılabilir. Sıcak akışkanın basınç ve özgül ısılarının zamanla değişmediği, kontrol hacmindeki sıcak akışkanın zamana göre iç enerji değişiminin küçük olduğu varsayılarak ihmal edilecektir. Böylece, yaklaşık olarak

$$\frac{d}{dt} (\Delta m_H e_H) \cong 0 \quad (3.13)$$

kabul edilebilir. Netice olarak, (3.1) denklemi,

$$\frac{m_H}{n} h_i + \frac{(hA)_H}{n} \left(\frac{dz_H}{L} \right) (T_w - T_H) = \frac{m_H}{n} h_i + \frac{m_H}{n} \frac{\partial h_i}{\partial z_H} dz_H \quad (3.14)$$

$\partial h = C_p \partial T$ olduğundan

$$\frac{\partial T_H}{\partial z_H} = \frac{(hA)_H}{C_H L} (T_w - T_H) \quad (3.15)$$

şeklini alır. Burada,

$$C_H = m_H c_{pH} \quad (3.16)$$

C_H : Sıcak akışkanın kapasite debisidir. (W/K)

Diferansiyel duvar elemanı için bir kontrol hacmi incelendiğinde (Şekil 3.3), aksenal ve açısal ısı iletimlerin ihmal edilmesi ile enerji denge denklemi

$$Q_{giriş} + Q_{cv} = \frac{dE_{cv}}{dt_H} + Q_{çıkış} + W_{cv} \quad (3.17)$$

$$Q_{giriş} = Q_{çıkış} = 0, \quad W_{cv} = 0 \quad (3.18)$$

olur.

Böylece,

$$\frac{(hA)_H}{n} \left(\frac{dz_H}{L} \right) (T_H - T_w) = \frac{\bar{C}_{r,H}}{n} \left(\frac{dz_H}{L} \right) \frac{\partial T_w}{\partial t_H} \quad (3.19)$$

$$\frac{\partial T_w}{\partial t_H} = \frac{(hA)_H}{\bar{C}_{r,H}} (T_H - T_w) \quad (3.20)$$

bulunur.

$$\bar{C}_{r,H} = M_w C_w N P_H \quad (3.21)$$

$\bar{C}_{r,H}$: Sıcak matrisin kapasite debisi, (W/K)

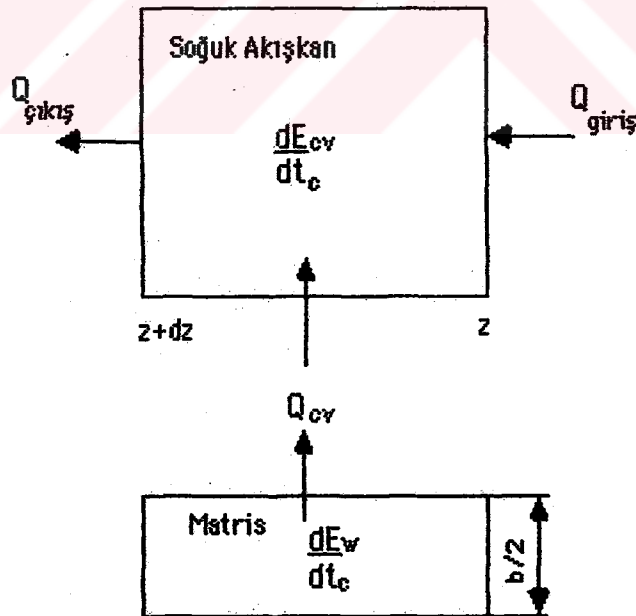
M_w : Matrisin toplam kütlesi, (kg)

C_w : Matris malzemesinin özgül ısısı, (J/kg K)

N : Rotorun devir sayısı, (s^{-1})

t_H : Sıcak periyodun başlangıcından ilgi alanına kadar geçen zaman, (s)

Yukarıdaki kısmi türevli denklemlerde, z-ekseninin orijini; sıcak akışkanların rejeneratöre girdiği nokta olarak ve z-ekseninin yönü ise sıcak akışkanların akış yönü olarak alınmaktadır. Soğuk akışkan için yukarıda tanımlanandan farklı bir orijin alınmaktadır. Bu orijin, soğuk akışkanın rejeneratöre girdiği bölge ve z-ekseni soğuk akışkanların akış yönü olacaktır (Şekil 3.1).



Şekil 3.4: Soğuk Akışkan Tarafı İçin Diferansiyel Elemanlar

Şekil 3.4 'deki diferansiyel elemanların ele alınmasıyla ve yukarıda açıklanan çözüm yoluna benzer bir yol kullanılarak, soğuk periyod için aşağıdaki kısmi türevli denklem elde edilir.

Akışkan elemanı için;

$$\frac{\partial T_c}{\partial z_c} = \frac{(hA)_c}{C_c L} (T_w - T_c) \quad (3.22)$$

Burada,

$$C_c = m_c c_{p_c}$$

C_c :Soğuk akışkanın kapasite debisidir. (W/K)

Matris için;

$$\frac{\partial T_w}{\partial t_c} = \frac{(hA)_c}{\bar{C}_{r,c}} (T_c - T_w) \quad (3.23)$$

olur.

$\bar{C}_{r,c}$:Soğuk matrisin kapasite debisi, (W/K)

z_c :Soğuk akışkan girişinden ölçülen aksenal mesafe, (m)

T_c :Soğuk akışkanların sıcaklığı, (K)

h_c :Matris duvarı ile soğuk akışkanlar arasındaki ısı taşınım katsayısı, (W/m² K)

A_c :Soğuk akışkanlara maruz kalan toplam ısı transfer alanı, (m²)

t_c :Soğuk periyodun başlangıcından ilgi alanına kadar geçen süre, (s)

(3.15, 3.20, 3.22 ve 3.23) denklemleri için sınır şartları,

$$T_H \Big|_{z_H=0} = \text{Sabit} \equiv T_{Hi} \quad \text{ve} \quad T_c \Big|_{z_c=0} = \text{Sabit} \equiv T_{ci}$$

yazılabilir.

T_{Hi} ve T_{ci} , sırasıyla, sıcak ve soğuk akışkanların giriş sıcaklıklarıdır. Geçiş periyodundan sonra, rejeneratör periyodik çalışma şartlarına ulaşır. Matris duvarlarındaki herhangi bir sabit noktada duvar sıcaklığı, dönüş periyoduna eşit bir periyodla, periyodik olarak değişir. Çözümün aşağıdaki sınır şartlarını sağlaması gerekir.

$$\begin{aligned} T_w \Big|_{z_H} &= T_w \Big|_{z_c} , & T_w \Big|_{z_c} &= T_w \Big|_{z_H} \\ t_H &= P_H & t_c &= 0 & t_c &= P_c & t_H &= 0 \end{aligned} \quad (3.24)$$

Burada, ($z_H = L - z_c$) dir.

3.3. Kısmi Türevli Denklemlerin Boyutsuz Hale Getirilmesi

Bu bölümde, (3.15, 3.20, 3.22 ve 3.23) denklemleri, $\epsilon - N_{w,o}$ yöntemi olarak bilinen Coppage ve London tarafından önerilen aşağıdaki boyutsuz oranlar kullanılarak boyutsuz formda yazılacaktır (Coppage ve London, 1953).

$$z_H^* \equiv \frac{z_H}{L}, \quad z_c^* \equiv \frac{z_c}{L}, \quad t_H^* \equiv \frac{t_H}{P_H}, \quad t_c^* \equiv \frac{t_c}{P_c} \quad (3.25)$$

$$N_{tu,H} \equiv \frac{(hA)_H}{C_H}, \quad N_{tu,c} \equiv \frac{(hA)_c}{C_c}, \quad C_{r,H}^* \equiv \frac{C_r}{C_H} \quad \text{ve} \quad C_{r,c}^* \equiv \frac{C_r}{C_c} \quad (3.26)$$

$$T_H^* \equiv \frac{T_H - T_{ci}}{T_{Hi} - T_{ci}}, \quad T_c^* \equiv \frac{T_c - T_{ci}}{T_{Hi} - T_{ci}}, \quad T_w^* \equiv \frac{T_w - T_{ci}}{T_{Hi} - T_{ci}} \quad (3.27)$$

$N_{tu,H}$: Sıcak taraftaki transfer birimleri sayısı, (-)

$N_{tu,c}$: Soğuk taraftaki transfer birimleri sayısı, (-)

C_r : Matrisin toplam kapasite debisi, (W/K)

$$C_r = \bar{C}_r N = M_w C_w N \quad (3.28)$$

İlgili kısmi türevli denklemler yukarıdaki boyutsuz terimlerin kullanılmasıyla şu şekilde yazılabilir.

$$\frac{\partial T_H}{\partial z_H} = (T_{Hi} - T_{ci}) \frac{\partial T_H^*}{\partial z_H^*} \frac{dz_H^*}{dz_H}, \quad \frac{\partial T_c}{\partial z_c} = (T_{Hi} - T_{ci}) \frac{\partial T_c^*}{\partial z_c^*} \frac{dz_c^*}{dz_c} \quad (3.29)$$

ve

$$\frac{\partial T_w}{\partial t_H} = (T_{Hi} - T_{ci}) \frac{\partial T_w^*}{\partial t_H^*} \frac{\partial t_H^*}{\partial t_H}, \quad \frac{\partial T_w}{\partial t_c} = (T_{Hi} - T_{ci}) \frac{\partial T_w^*}{\partial t_c^*} \frac{\partial t_c^*}{\partial t_c} \quad (3.30)$$

Aynı zamanda,

$$\frac{dz_H^*}{dz_H} = \frac{1}{L}, \quad \frac{dz_c^*}{dz_c} = \frac{1}{L}, \quad \frac{dt_H^*}{dt_H} = \frac{1}{P_H}, \quad \frac{dt_c^*}{dt_c} = \frac{1}{P_c} \quad (3.31)$$

Böylece,

$$\frac{\partial T_H}{\partial z_H} = (T_{Hi} - T_{ci}) \frac{1}{L} \frac{\partial T_H^*}{\partial z_H^*}, \quad \frac{\partial T_c}{\partial z_c} = (T_{Hi} - T_{ci}) \frac{1}{L} \frac{\partial T_c^*}{\partial z_c^*} \quad (3.32)$$

$$\frac{\partial T_w}{\partial t_H} = \frac{(T_{Hi} - T_{ci})}{P_H} \frac{\partial T_w^*}{\partial t_H^*}, \quad \frac{\partial T_w}{\partial t_c} = \frac{(T_{Hi} - T_{ci})}{P_c} \frac{\partial T_w^*}{\partial t_c^*} \quad (3.33)$$

bulunur.

(3.32 ve 3.33) eşitliklerini (3.15, 3.20, 3.22 ve 3.23) kısmi türevli denklemlerde yerine koyarak, aşağıdaki boyutsuz kısmi türevli denklemler elde edilir.

Sıcak periyod için;

$$\frac{\partial T_H^*}{\partial z_H^*} = N_{tu,H} (T_w^* - T_H^*) \quad (3.34)$$

$$\frac{\partial T_w^*}{\partial t_H^*} = \frac{N_{tu,H}}{C_{r,H}^*} (T_H^* - T_w^*) \quad (3.35)$$

Soğuk periyod için;

$$\frac{\partial T_c^*}{\partial z_c^*} = N_{tu,c} (T_w^* - T_c^*) \quad (3.36)$$

$$\frac{\partial T_w^*}{\partial t_c^*} = \frac{N_{tu,c}}{C_{r,c}^*} (T_c^* - T_w^*) \quad (3.37)$$

yazılabilir.

Yukarıda yazılan boyutsuz kısmi türevli denklemler için, boyutsuz sınır şartları;

$$T_H^* \Big|_{z_H^*=0} = 1, \quad T_c^* \Big|_{z_c^*=0} = 0 \quad (3.38)$$

ve zaman şartları;

$$\begin{array}{c} T_v^* \Big|_{z_H^*} \\ t_H^*=1 \end{array} = \begin{array}{c} T_v^* \Big|_{z_C^*} \\ t_C^*=0 \end{array} \quad \text{ve} \quad \begin{array}{c} T_v^* \Big|_{z_C^*} \\ t_C^*=1 \end{array} = \begin{array}{c} T_v^* \Big|_{z_H^*} \\ t_H^*=0 \end{array} \quad (3.39)$$

şeklindedir. Burada, $z_H^* = 1 - z_C^*$ dir.

Rejeneratördeki sıcaklık dağılımının bulunmasından sonra, rejeneratör çıkışındaki sıcak ve soğuk akışkanların zamana göre ortalaması alınmış sıcaklıkları hesaplanır. Dönel rejeneratörün matrisine binen bir gözlemci için, herhangi bir yerdeki akışkan sıcaklığının zamanın bir fonksiyonu olduğu hatırlarda tutulmalıdır. Böylece rejeneratör çıkışındaki sıcak ve soğuk akışkanların ortalama sıcaklığı $\bar{T}_{H,o}^*$ ve $\bar{T}_{c,o}^*$ aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$\bar{T}_{H,o}^* = \frac{1}{P_H} \int_0^{P_H} T_{H,p}^* dt_H = \int_0^1 T_{H,o}^* dt_H^* \quad (3.40)$$

$$\bar{T}_{c,o}^* = \frac{1}{P_C} \int_0^{P_C} T_{c,o}^* dt_C = \int_0^1 T_{c,o}^* dt_C^* \quad (3.41)$$

Sıcaklık dağılımları, ilerideki bölümlerde anlatılan sonlu farklar yöntemi kullanılarak (3.34, 3.35, 3.36 ve 3.37) denklemlerinden sayısal olarak bulunduğundan, akışkanların çıkış sıcaklıkları sadece her düğüm noktasında bilinmektedir. Böylece integraller, sadece trapezoid

integrasyon kuralı gibi sayısal teknikler kullanılarak ifade edilebilir.

$$\frac{\bar{T}_{H,o}^*}{T_{H,o}^*} \approx \frac{\Delta S_H}{2} (T_{H,\rho 1}^* + 2T_{H,\rho 2}^* + 2T_{H,\rho 3}^* + \dots + 2T_{H,\rho m_H}^* + T_{H,\rho m_H+1}^*) \quad (3.42)$$

$$\frac{\bar{T}_{c,o}^*}{T_{c,o}^*} \approx \frac{\Delta S_c}{2} (T_{c,\rho 1}^* + 2T_{c,\rho 2}^* + 2T_{c,\rho 3}^* + \dots + 2T_{c,\rho m_c}^* + T_{c,\rho m_c+1}^*) \quad (3.43)$$

Burada m_H ve m_c , sırasıyla sıcak ve soğuk taraflarda sayısal hesap için kullanılan zaman aralıklarının sayısını göstermektedir.

$$\Delta S_H = 1/m_H \quad (3.44)$$

$$\Delta S_c = 1/m_c \quad (3.45)$$

3.4. Rejeneratör Etkinliği

Rejeneratör etkinliği (ϵ), düzenli periyodik çalışma şartları için, gerçek ısı transferinin mümkün olan en yüksek ısı transferine oranı olarak tanımlanmaktadır.

Düzenli periyodik çalışma esnasında sıcak akışkandan soğuk akışkana transfer edilen gerçek ısı miktarı; sıcak akışkan tarafından kaybedilen enerjiden veya soğuk akışkan tarafından kazanılan enerjiden hesaplanabilir.

$$Q_{ec} = C_H (T_{H,i} - \bar{T}_{H,o}) = C_c (\bar{T}_{c,o} - T_{c,i}) \quad (3.46)$$

Mümkün olan en yüksek ısı transferi şu şekilde ifade edilebilir.

$$Q_{\max} = C_{\min} (T_{H,i} - T_{c,i}) \quad (3.47)$$

$$C_{\min} = (m c_p)_{\min}$$

C_{\min} : Minimum kapasite debisidir. (W/K)

Elde edilen rejeneratör etkinliği,

$$\varepsilon = \frac{C_H (T_{H,i} - \bar{T}_{H,o})}{C_{\min} (T_{H,i} - T_{c,i})} = \frac{C_c (\bar{T}_{c,o} - T_{c,i})}{C_{\min} (T_{H,i} - T_{c,i})} \quad (3.48)$$

olarak bulunur.

3.5. Kısmi Türevli Denklemlerin Çözümü

(3.38) ve (3.39) şartlarını sağlayan (3.34, 3.35, 3.36 ve 3.37) denklemlerin çözümü, trapez kuralının uygulanmasıyla elde edilir. Sıcak ve soğuk akışkanlar için, z^* konum koordinatının başlangıcı, akışkan girişinden alındığından; sıcak ve soğuk periyotlar için aynı denklemler sadece ilgili indisler değiştirilerek kullanılabilir. Akışkanı göstermek için "c" veya "H" yerine "f" indisi kullanılacaktır. Bunun sonucu olarak sıcak ve soğuk periyotta kullanılabilen ilgili denklemler aşağıdaki gibi yazılır.

$$\frac{\partial T_f^*}{\partial z^*} = N_{tu,f} (T_w^* - T_f^*) \quad (3.49)$$

$$\frac{\partial T_w^*}{\partial t_f^*} = \frac{N_{tu,f}}{C_{r,f}} (T_f^* - T_w^*) \quad (3.50)$$

Akışkan ve matris malzemesinin sıcaklığı aksenal uzaklığın ve zamanın bir fonksiyonu olarak değişir. Şekil 3.5 'de, rejeneratör üzerinde sabit bir nokta seçilirse bu noktadaki sıcaklığın bulunabilmesi için kullanılan düğüm noktası sistemi gösterilmiştir. Düşey eksen; boyut aksenal yönü (z^*) gösterir. Düğüm noktalarının yerini belirlemek için rejeneratörün girişinden çıkışına kadar eşit mesafelere bölünür. Yatay eksen; boyutsuz zamanı belirtir. Boyutsuz zaman kordinatının büyüklüğü boyutsuz sıcak ve soğuk peryodların toplamına eşittir. Isı transferi sürecinin periyodik yapısından dolayı boyutsuz zaman eksenini boyunca düğüm noktalarını belirlemek için yatay eksen de eşit parçalara bölünür.

Çözümüne başlamak için sıcak peryodun başlangıcında z^* eksenini boyunca matris malzemesinin sıcaklık dağılımının bilindiği varsayılacaktır. Varsayılan başlangıç sıcaklık dağılımı ne olursa olsun, dışarıdaki bir gözlemci için uzun bir zaman peryodundan sonra (sürekli periyodik rejime ulaştığında) rejeneratördeki periyodik sıcaklık dağılımı devamlı aynı olacağı tahmin edilebilir. Bu problemin bilgisayarla çözümünde, sıcak peryodun başlangıcında rejeneratörün ilk sıcaklığı çevre sıcaklığı olarak alınmıştır. Bundan sonraki analizde elde edilecek sonlu fark denklemlerinin kullanılmasıyla akışkan ve matris sıcaklıklarının değerleri, her düğüm noktasında ayrı ayrı bulunacaktır.

Hesaplamalar; akışkan ve matris sıcaklıklarını boyutsuz kordinatın

ve boyutsuz zamanın fonksiyonu olarak elde edecek şekilde yapılacaktır. Başlangıçtan itibaren yapılan hesaplamalara sıcak periyodun sonuna ulaşınca kadar devam edilir. Sıcak periyod bittiği zaman bu defa soğuk taraf için geçerli sonlu fark denklemleri kullanılarak (z^* ekseninde orijinde uygun değişimler yapılarak) soğuk periyod içindeki akışkan ve matris sıcaklıkları hesaplanır. Soğuk ve sıcak periyodların sonundaki matris sıcaklıkları, daha sonraki periyodların başlangıcındaki matris sıcaklık dağılımı olarak alınır. Bu hesaplamalar, ilk geçiş periyodu bitinceye ve sıcaklık dağılımı periyodik oluncaya kadar devam eder. Periyodik duruma ulaşıp ulaşılmadığı aşağıdaki şartların sağlanıp sağlanmadığı kontrol edilerek tesbit edilir.

$$T_f \Big|_{z_f, t_f} = T_f \Big|_{z_f, t_f + P_t} \quad \text{ve} \quad T_w \Big|_{z_f, t_f} = T_w \Big|_{z_f, t_f + P_t} \quad (3.51)$$

Burada, P_t sıcak ve soğuk periyodların toplamıdır.

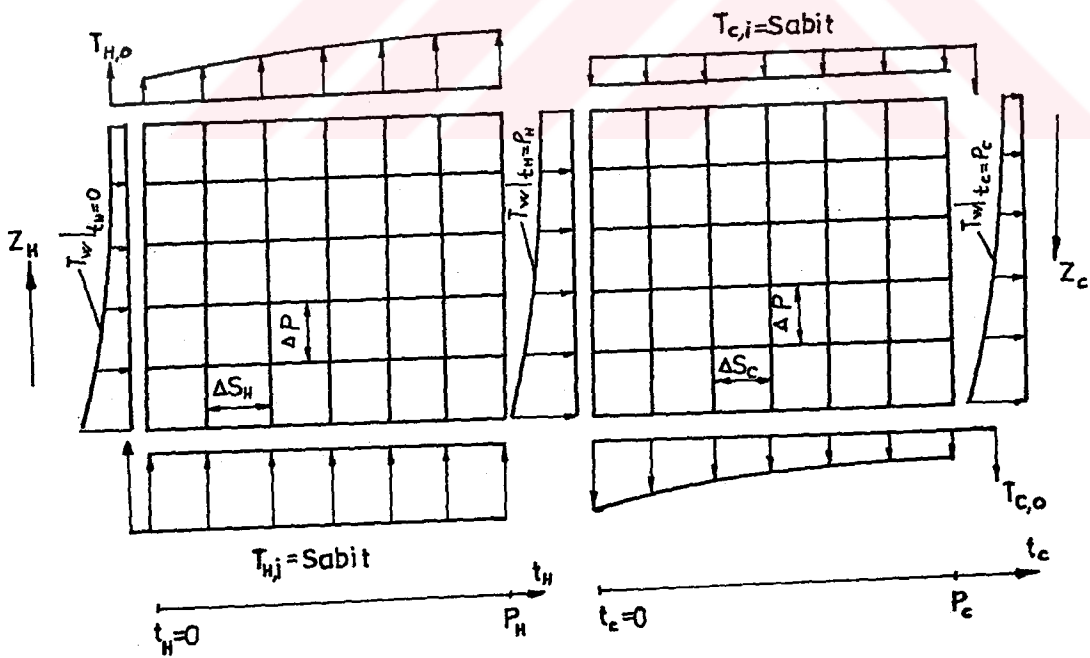
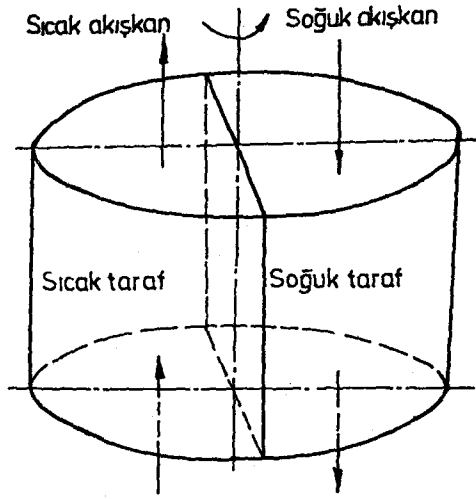
Trapez kuralına göre bir $f(z)$ fonksiyonunun herhangi bir belirli integrali aşağıdaki bağıntı ile yaklaşık olarak bulunabilir.

z_i 'den z_{i+1} 'e kadar her Δz aralığı için,

$$\int_{z_i}^{z_{i+1}} f(z) dz \approx \frac{\Delta z}{2} [f(z_i) + f(z_{i+1})] \quad (3.52)$$

Bu bağıntı kullanılarak ilgili kısmi türevli denklemler şu şekilde ifade edilebilir.

$$\int_p^{p+1} \frac{\partial T_f^*}{\partial z^*} dz^* \approx \frac{\Delta p}{2} \left[\frac{\partial T_f^*}{\partial z^*} \Big|_{\frac{p}{s+1}} + \frac{\partial T_f^*}{\partial z^*} \Big|_{\frac{p}{s+1}} \right] \quad (3.53)$$



Şekil 3.5: Sonlu Farklar Ağı

Burada, p ve s sırasıyla sonlu fark eleği üzerindeki bir noktanın konum ve zaman kordinat indisleridir. Δp ise z eksenini boyunca düğüm noktaları arasındaki mesafedir. Aynı zamanda,

$$\int_p^{p+1} \frac{\partial T_f^*}{\partial z^*} dz^* = T_f^* \Big|_{s+1}^{p+1} - T_f^* \Big|_p^{s+1} \quad (3.54)$$

şeklinde yazılabilir. (3.54) denkleminin (3.53) denkleminde yerine konulmasıyla,

$$T_f^* \Big|_{s+1}^{p+1} = T_f^* \Big|_p^{s+1} + \frac{\Delta p}{2} \left[\frac{\partial T_f^*}{\partial z^*} \Big|_{s+1}^{p+1} + \frac{\partial T_f^*}{\partial z^*} \Big|_p^{s+1} \right] \quad (3.55)$$

bulunur.

Kullanışlı olması bakımından bundan sonra aşağıdaki notasyon kullanılacaktır.

$$T_f^* \Big|_{s+1}^{p+1} \rightarrow T_f(p+1, s+1)$$

Bu notasyon boyutsuz akışkan sıcaklığının, konum ve zaman kordinatlarının sırasıyla p+1 ve s+1 olduğu düğüm noktasındaki değerini belirtmektedir.

(3.49) denkleminde aşağıdaki denklemler elde edilir.

$$\frac{\partial T_f^*}{\partial z^*} \Big|_{s+1}^{p+1} = N_{u,f} [T_w^*(p+1, s+1) - T_f^*(p+1, s+1)] \quad (3.56)$$

$$\left. \frac{\partial T_f^*}{\partial z^*} \right|_{p, s+1} = Nu_{f,1} [T_w^*(p, s+1) - T_f^*(p, s+1)] \quad (3.57)$$

Yukarıdaki denklemlerin (3.55) de yerine konulmasıyla, koordinatları $p+1$ ve $s+1$ olan düğüm noktasındaki boyutsuz akışkan sıcaklığını veren denklem elde edilir.

$$T_f^*(p+1, s+1) = T_f^*(p, s+1) + \frac{Nu_{f,1} \Delta p}{2} [T_w^*(p+1, s+1) - T_f^*(p+1, s+1) + T_w^*(p, s+1) - T_f^*(p, s+1)] \quad (3.58)$$

Benzer şekilde duvar sıcaklıkları için aşağıdaki denklemler yazılabilir.

$$\int_s^{s+1} \frac{\partial T_w^*}{\partial t_f^*} dt_f^* \approx \frac{\Delta S_f}{2} \left[\left. \frac{\partial T_w^*}{\partial t_f^*} \right|_{p+1, s+1} + \left. \frac{\partial T_w^*}{\partial t_f^*} \right|_{p+1, s} \right] \quad (3.59)$$

$$\int_s^{s+1} \frac{\partial T_w^*}{\partial t_f^*} dt_f^* = T_w^*(p+1, s+1) - T_w^*(p+1, s) \quad (3.60)$$

(3.59) denkleminde,

$$\left. \frac{\partial T_w^*}{\partial t_f^*} \right|_{p+1, s+1} = \frac{Nu_{f,1}}{C_{r,f}^*} [T_f^*(p+1, s+1) - T_w^*(p+1, s+1)] \quad (3.61)$$

ve

$$\left. \frac{\partial T_w^*}{\partial t_f^*} \right|_{p+1, s} = \frac{Nu_{f,1}}{C_{r,f}^*} [T_f^*(p+1, s) - T_w^*(p+1, s)] \quad (3.62)$$

bulunur.

(3.60), (3.61) ve (3.62) denklemlerinin (3.59) de yerine konulmasıyla, kordinatları $p+1$ ve $s+1$ olan düğüm noktasındaki boyutsuz matris sıcaklığını veren denklem elde edilir.

$$T_w^*(p+1, s+1) = T_w^*(p+1, s) + \frac{N_{tu,f} \Delta S_f}{2 C_{r,f}} [T_f^*(p+1, s+1) - T_w^*(p+1, s+1) + T_f^*(p+1, s) - T_w^*(p+1, s)] \quad (3.63)$$

Burada, ΔS_f sıcak ve soğuk tarafta zaman eksenini boyunca ardışık iki düğüm noktası arasındaki mesafedir. (3.58) denklemini aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$T_f^*(p+1, s+1) = A_1 T_f^*(p, s+1) + A_2 [T_w^*(p+1, s+1) + T_w^*(p, s+1)] \quad (3.64)$$

Burada,

$$A_1 \equiv \frac{2 - N_{tu,f} \Delta p}{2 + N_{tu,f} \Delta p} \quad \text{ve} \quad A_2 \equiv \frac{N_{tu,f} \Delta p}{2 + N_{tu,f} \Delta p} \quad (3.65)$$

değerlerine eşdeğerdir. (3.64) denkleminin (3.63) de yerine konulması ve yeniden düzenlenmesi ile duvar sıcaklığı için aşağıdaki denklem elde edilir.

$$T_w^*(p+1, s+1) = K_1 T_w^*(p+1, s) + K_2 T_f^*(p+1, s) + K_3 T_w^*(p, s+1) + K_4 T_f^*(p, s+1) \quad (3.66)$$

Burada,

$$K_1 \equiv \frac{1 - \frac{N_{tu,f} \Delta S_f}{2C_{r,f}^*}}{1 - \frac{A_2 N_{tu,f} \Delta S_f}{2C_{r,f}^*} + \frac{N_{tu,f} \Delta S_f}{2C_{r,f}^*}} \quad (3.67)$$

$$K_2 \equiv \frac{\frac{N_{tu,f} \Delta S_f}{2C_{r,f}^*}}{1 - \frac{A_2 N_{tu,f} \Delta S_f}{2C_{r,f}^*} + \frac{N_{tu,f} \Delta S_f}{2C_{r,f}^*}} \quad (3.68)$$

$$K_3 \equiv \frac{\frac{A_2 N_{tu,f} \Delta S_f}{2C_{r,f}^*}}{1 - \frac{A_2 N_{tu,f} \Delta S_f}{2C_{r,f}^*} + \frac{N_{tu,f} \Delta S_f}{2C_{r,f}^*}} \quad (3.69)$$

ve

$$K_4 \equiv \frac{\frac{A_1 N_{tu,f} \Delta S_f}{2C_{r,f}^*}}{1 - \frac{A_2 N_{tu,f} \Delta S_f}{2C_{r,f}^*} + \frac{N_{tu,f} \Delta S_f}{2C_{r,f}^*}} \quad (3.70)$$

yazılabilir. Rejeneratör girişinde, $\Delta p=0$

$$A_1 = 1, A_2 = 0$$

$$K_1 = \frac{1 - \frac{N_{tu,f} \Delta S_f}{2C_{r,f}^*}}{1 + \frac{N_{tu,f} \Delta S_f}{2C_{r,f}^*}} \equiv B_1, \quad K_2 = \frac{\frac{N_{tu,f} \Delta S_f}{2C_{r,f}^*}}{1 + \frac{N_{tu,f} \Delta S_f}{2C_{r,f}^*}} \equiv B_2 \quad (3.71)$$

$$K_3 = 0 \quad \text{ve} \quad K_4 = \frac{\frac{N_{tu,f} \Delta S_f}{2 C_{r,f}^*}}{1 + \frac{N_{tu,f} \Delta S_f}{2 C_{r,f}^*}} \equiv B_2 \quad (3.72)$$

bulunur. Böylece, rejeneratör girişinde şu denklem yazılabilir.

$$T_w^*(p, s+1) = B_1 T_w^*(p, s) + B_2 [T_f^*(p, s+1) + T_f^*(p, s)] \quad (3.73)$$

$p=1$ dir.

$$T_w^*(1, s+1) = B_1 T_w^*(1, s) + B_2 [T_f^*(1, s+1) + T_f^*(1, s)] \quad (3.74)$$

Girişteki bütün düğüm noktaları için boyutsuz akışkan sıcaklığı $T_f^*(1, s)$, sıcak peryodda 1 ve soğuk peryodda sıfırdır.

Sıcak peryod için;

$$T_w^*(1, s+1) = B_1 T_w^*(1, s) + 2B_2 \quad (3.75)$$

Soğuk peryod için;

$$T_w^*(1, s+1) = B_1 T_w^*(1, s) \quad (3.76)$$

olur.

Rejeneratörler için, reküperatör tipli ısı değiştiricilerinde kullanılan transfer birimleri sayısına benzer boyutsuz bir parametre tanımlamak mümkündür. Bu parametreye, "Düzeltilmiş transfer birimleri sayısı" denir. Aşağıdaki şekilde tanımlanır (Kays ve London, 1964).

$$N_{tu,o} = \frac{1}{\frac{C_{min}}{(hA)_H} + \frac{C_{min}}{(hA)_c}} \quad (3.77)$$

C_c teriminin küçük kapasite debisine sahip akışkanın kapasite debisi olduğu durumlarda,

$$N_{tu,o} = \frac{1}{\frac{C_c}{(hA)_H} + \frac{C_c}{(hA)_c}} = \frac{1}{\frac{C_c/C_H}{(hA)_H/C_H} + \frac{C_c/C_c}{(hA)_c/C_c}} \quad (3.78)$$

veya

$$N_{tu,o} = \frac{1}{\frac{(C_{r,H}^*/C_{r,c}^*)}{N_{tu,H}} + \frac{1}{N_{tu,c}}} \quad (3.79)$$

yazılabilir. Buradaki boyutsuz sayıların tanımı aşağıda verilmiştir.

$N_{tu,H}$: Sıcak taraftaki transfer birimleri sayısı, (-)

$$N_{tu,H} \equiv \frac{(hA)_H}{C_H} \quad (3.80)$$

$(hA)_H$: Sıcak taraftaki ısı taşınım kondüktansı, (W/K)

$N_{tu,c}$: Soğuk taraftaki transfer birimleri sayısı, (-)

$$N_{tu,c} \equiv \frac{(hA)_c}{C_c} \quad (3.81)$$

$(hA)_c$: Soğuk taraftaki ısı taşınım kondüktansı, (W/K)

$$C_{r,H}^* \equiv \frac{C_r}{C_H}, \quad C_{r,c}^* \equiv \frac{C_r}{C_c} \quad (3.82)$$

C_r :Matris malzemesinin kapasite debisi, (W/K)

$$C_r = M_v C_v N \quad (3.83)$$

M_v :Matrisin toplam kütlesi, (kg)

C_v :Matris malzemesinin özgül ısısı, (J/kg K)

N :Matrisin devir sayısı, (s^{-1})

$$\frac{C_{r,H}^*}{C_{r,c}^*} = \frac{C_c}{C_H} = C^* \quad (3.84)$$

C^* :Akışkanların kapasite debilerinin oranı, (-)

$$C^* \equiv \frac{C_{min}}{C_{max}} = \frac{C_c}{C_H} \quad (3.85)$$

Matris malzemesinin boyutsuz kapasite debisi için, C_r^* parametresi şu şekilde tanımlanır.

$$C_r^* = \frac{C_r}{C_{min}} \quad (3.86)$$

Bu çalışmada soğuk akışkanların kapasite debisi minimum kapasite debisi kabul edildiğinden C_r^* terimi

$$C_r^* = \frac{C_r}{C_c} = C_{r,c}^* \quad (3.87)$$

şeklinde yazılır.

Isı taşınım kondüktans oranı,

$$(hA)^* \equiv \frac{(hA)_c}{(hA)_H} \quad (3.88)$$

veya

$$(hA)^* = \left(\frac{N_{tu,c}}{N_{tu,H}} \right) \left(\frac{C_{r,H}^*}{C_{r,c}^*} \right) \quad (3.89)$$

eşitlikleriyle verilebilir.

$C_{r,H}^*$, $C_{r,c}^*$, $N_{tu,H}$ ve $N_{tu,c}$ ifadeleri, C^* , $N_{tu,o}$ ve $(hA)^*$ terimleriyle ilişkileri için aşağıdaki ifadeler geçerlidir.

$$N_{tu,H} = C^* N_{tu,o} [1 + 1/(hA)^*] \quad (3.90)$$

$$N_{tu,c} = N_{tu,o} [1 + (hA)^*] \quad (3.91)$$

$$C_{r,H}^* = C^* C_r^* \quad (3.92)$$

$$C_{r,o}^* = C_r^* \quad (3.93)$$

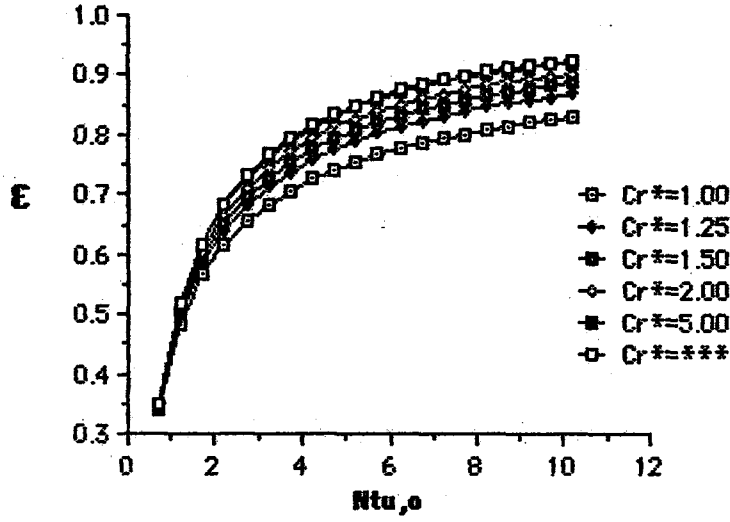
4. SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME

4.1. Rejeneratör Performans Eğrileri

Örnek olarak akışkanların boyutsuz kapasite debileri oranı $C^*=1$ alınarak Bölüm 3' te anlatılan hesaplamalar yapılmıştır. Sonuçlar Tablo 4.1' de verilmiştir. Bu sonuçlara göre rejeneratör etkinlik eğrileri Şekil 4.1'de gösterilmiştir. Bu hesaplamalarda sıcak ve soğuk taraflarda 40×45 ' lik bir sonlu farklar ağı alınmıştır. Bu sonlu farklar ağı için Bölüm 3.5' de verilen yakınsaklık kriteri uygundur. 40×45 lik çözümde ağın yeterli hassasiyette yakınsak sonuçlar verdiği anlaşılmıştır. Şekilde görüldüğü gibi düzeltilmiş transfer birimleri sayısının artmasına bağlı olarak rejeneratör etkinliği de artmaktadır. Düşük $N_{tu,o}$ değerlerinde, önce hızlı bir artış gösteren rejeneratör etkinliği belli bir noktadan sonra gittikçe yataylaşmakta ve bir noktadan sonra, $N_{tu,o}$ ' nun artırılmasının rejeneratör etkinliği üzerine etkisinin çok azaldığı görülmektedir. Genelde $N_{tu,o}=8$ değerinden sonra söz konusu durum hakimdir. Öyleyse düzeltilmiş transfer birimleri sayısını artırmak bir noktadan sonra rejeneratör etkinliğini değiştirmemektedir. Matris boyutsuz kapasite debisi C_r^* in artırılması rejeneratör etkinliğinin de artmasına neden olmaktadır. Ancak C_r^* in sürekli artırılması rejeneratör etkinliğinin de artacağı anlamına gelmemektedir. Nitekim $C_r^* =5$ ile $C_r^* =\infty$ arasında rejeneratör etkinliğindeki değişme ihmal edilecek derecede küçük kalmaktadır.

Tablo 4.1: Düzeltilmiş Transfer Birimleri Sayısına ve Boyutsuz Matris Kapasite Debisine Göre Rejeneratör Etkinlik Değerleri.

| $N_{to} \backslash C_r^*$ | 1 | 1.25 | 1.5 | 2 | 5 | ∞ |
|---------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|----------|
| 0.5 | 0.3221 | 0.3260 | 0.3282 | 0.3304 | 0.3325 | 0.3326 |
| 1.0 | 0.4665 | 0.4780 | 0.4845 | 0.4912 | 0.4984 | 0.4993 |
| 1.5 | 0.5477 | 0.5656 | 0.5757 | 0.5861 | 0.5976 | 0.5991 |
| 2.0 | 0.6007 | 0.6232 | 0.6360 | 0.6491 | 0.6636 | 0.6657 |
| 2.5 | 0.6385 | 0.6646 | 0.6792 | 0.6941 | 0.7109 | 0.7132 |
| 3.0 | 0.6672 | 0.6959 | 0.7118 | 0.7280 | 0.7462 | 0.7487 |
| 3.5 | 0.6900 | 0.7208 | 0.7377 | 0.7546 | 0.7736 | 0.7763 |
| 4.0 | 0.7086 | 0.7410 | 0.7585 | 0.7760 | 0.7957 | 0.7985 |
| 4.5 | 0.7243 | 0.7580 | 0.7759 | 0.7987 | 0.8137 | 0.8166 |
| 5.0 | 0.7376 | 0.7724 | 0.7907 | 0.8086 | 0.8287 | 0.8317 |
| 5.5 | 0.7491 | 0.7848 | 0.8033 | 0.8212 | 0.8414 | 0.8443 |
| 6.0 | 0.7593 | 0.7957 | 0.8143 | 0.8322 | 0.8524 | 0.8553 |
| 6.5 | 0.7682 | 0.8053 | 0.8240 | 0.8418 | 0.8618 | 0.8647 |
| 7.0 | 0.7763 | 0.8139 | 0.8327 | 0.8503 | 0.8701 | 0.8730 |
| 7.5 | 0.7835 | 0.8216 | 0.8403 | 0.8578 | 0.8774 | 0.8804 |
| 8.0 | 0.7901 | 0.8286 | 0.8472 | 0.8646 | 0.8840 | 0.8869 |
| 8.5 | 0.7961 | 0.8350 | 0.8535 | 0.8707 | 0.8897 | 0.8927 |
| 9.0 | 0.8017 | 0.8407 | 0.8593 | 0.8762 | 0.8949 | 0.8979 |
| 9.5 | 0.8068 | 0.8461 | 0.8645 | 0.8813 | 0.8997 | 0.9024 |
| 10.0 | 0.8115 | 0.8510 | 0.8694 | 0.8859 | 0.9041 | 0.9069 |



Şekil 4.1: Rejeneratör Etkinliğinin Düzeltilmiş Transfer Birimleri Sayısına Göre Değişimi.

Denklem (3.77)' de $N_{tu,o}$ ' nun artması, $(hA)_H$ ve $(hA)_c$ ' nin artması veya C_{min} ' nin azalması demektir. Daha büyük (hA) değerleriyle rejeneratörde daha fazla ısı aktarımı elde etmek mümkün olacaktır.

Şekil 4.1' deki rejeneratör etkinlik eğrileri, ısı taşınım kondüktans oranı $(hA)^* = 1$ için çizilmiştir. Isı taşınım kondüktans oranının etkinlik üzerine etkisini incelemek için aynı hesaplamalar $(hA)^*$ ın farklı değerleri için de yapılmıştır ve $(hA)^*$ ın etkinlik üzerine etkisinin ihmal edilebilir olduğu sonucuna varılmıştır. Örnek olarak $C^* = 1$, $C_r^* = 1$ ve $N_{tu,o} = 8$ iken $(hA)^*$ ın farklı değerleri için rejeneratör etkinliği hesaplanmış ve sonuçlar Tablo 4.2' de gösterilmiştir.

Tablo 4.2: Isı Taşımın Kondüktans Oranına Göre Rejeneratör Etkinlik Değerleri ($C^* = 1.0$, $C_r^* = 1$ ve $N_{tu,o} = 8$ için).

| $(hA)^*$ | Etkinlik, ϵ |
|----------|----------------------|
| 0.3 | 0.7912 |
| 0.8 | 0.7902 |
| 1.0 | 0.7901 |
| 1.5 | 0.7903 |
| 4.0 | 0.7916 |

London ve Kays tarafından verilen ampirik bağıntıya göre; C_r^* 'nin artmasıyla rejeneratör etkinliği, reküperatör tipi karşıt akışlı bir ısı değiştiricisi etkinliğinin maksimum değerine yaklaşır. London ve Kays'ın ampirik ifadesi aşağıdaki gibidir. Bu bağıntıya göre hesaplanan rejeneratör etkinlik değerleri tablo 4.3' de verilmiştir (Kays ve London, 1964).

$$\epsilon = \epsilon_r [1 - 1/(9C_r^{*1.93})]$$

$C^* = 1$ için

$$\epsilon_r = \frac{N_{tu,o}}{1 + N_{tu,o}}$$

dir. ϵ_r = Karşıt akışlı reküperatör tipli ısı değiştiricisi etkinliği, (-)

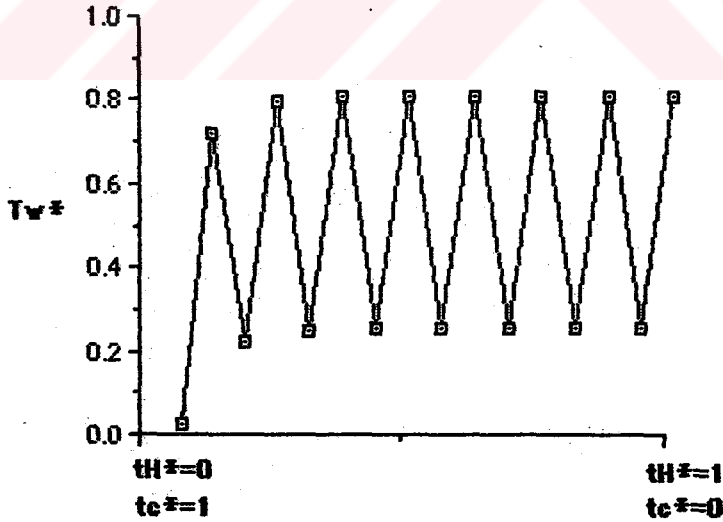
London ve Kays tarafından verilen etkinlik değerleri ile bilgisayar programından bulduğumuz rejeneratör etkinlik değerleri birbirine çok yakındır. Bu da çözüm yönteminin doğruluğunu göstermektedir.

Tablo 4.3: Düzeltilmiş Transfer Birimleri Sayısına ve Boyutsuz Matris Kapasite Debisine Göre Rejeneratör Etkinlik Değerleri.

| $N_{to} \backslash C_r^*$ | 1 | 1.25 | 1.5 | 2 | 5 | ∞ |
|---------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|----------|
| 0.5 | 0.3220 | 0.3260 | 0.3280 | 0.3300 | 0.3330 | 0.3330 |
| 1.0 | 0.4670 | 0.4780 | 0.4850 | 0.4910 | 0.4990 | 0.5000 |
| 1.5 | 0.5480 | 0.5660 | 0.5760 | 0.5860 | 0.5980 | 0.6000 |
| 2.0 | 0.6010 | 0.6230 | 0.6360 | 0.6490 | 0.6640 | 0.6670 |
| 2.5 | 0.6390 | 0.6650 | 0.6790 | 0.6940 | 0.7110 | 0.7140 |
| 3.0 | 0.6670 | 0.6960 | 0.7120 | 0.7280 | 0.7460 | 0.7500 |
| 3.5 | 0.6900 | 0.7210 | 0.7380 | 0.7550 | 0.7740 | 0.7780 |
| 4.0 | 0.7090 | 0.7410 | 0.7590 | 0.7760 | 0.7960 | 0.8000 |
| 4.5 | 0.7240 | 0.7580 | 0.7760 | 0.7940 | 0.8140 | 0.8180 |
| 5.0 | 0.7380 | 0.7720 | 0.7910 | 0.8090 | 0.8290 | 0.8330 |
| 5.5 | 0.7490 | 0.7850 | 0.8030 | 0.8210 | 0.8420 | 0.8460 |
| 6.0 | 0.7590 | 0.7960 | 0.8140 | 0.8320 | 0.8530 | 0.8570 |
| 6.5 | 0.7680 | 0.8050 | 0.8240 | 0.8420 | 0.8620 | 0.8670 |
| 7.0 | 0.7760 | 0.8140 | 0.8330 | 0.8500 | 0.8700 | 0.8750 |
| 7.5 | 0.7840 | 0.8220 | 0.8400 | 0.8580 | 0.8780 | 0.8820 |
| 8.0 | 0.7900 | 0.8290 | 0.8470 | 0.8650 | 0.8840 | 0.8890 |
| 8.5 | 0.7960 | 0.8350 | 0.8540 | 0.8710 | 0.8900 | 0.8950 |
| 9.0 | 0.8020 | 0.8410 | 0.8590 | 0.8760 | 0.8950 | 0.9000 |
| 9.5 | 0.8070 | 0.8460 | 0.8640 | 0.8810 | 0.9000 | 0.9050 |
| 10.0 | 0.8110 | 0.8510 | 0.8690 | 0.8860 | 0.9040 | 0.9090 |

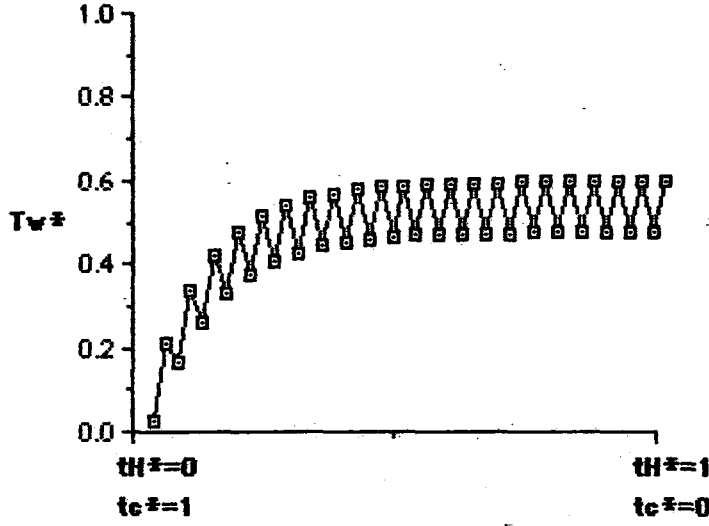
Zamanın fonksiyonu olarak, matrisin sabit bir noktasında sıcaklığın değişimi Şekil 4.2 ve 4.3' de gösterilmiştir. Şekil 4.2' de matris boyutsuz kapasite debisi $C_r^* = 1$ iken rejeneratör düzenli peryodik çalışma şartlarına yaklaşık 6 çevrimden sonra ulaşabilmektedir. Bu şekilde görüldüğü gibi sıcak ve soğuk peryodlar esnasında matris üzerindeki belirli bir noktanın sıcaklık değişimi büyük olmaktadır.

Şekil 4.3' de matris boyutsuz kapasite debisi $C_r^* = 5$ iken rejeneratör düzenli peryodik çalışma şartlarına yaklaşık 21 çevrimden sonra ulaşabilmektedir. Bu şekilde görüldüğü gibi sıcak ve soğuk peryodlarda matris sıcaklığındaki değişim küçük olmaktadır.



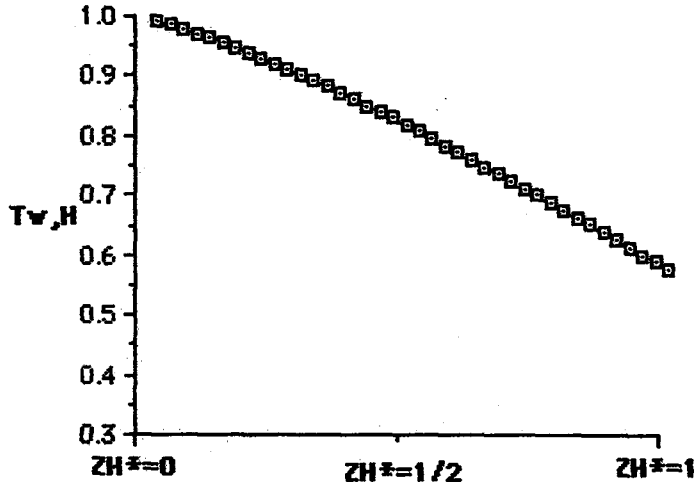
Şekil 4.2: Matris Üzerinde Sabit Bir Noktanın Sıcaklık Değişimi

($C^* = 0.95$, $C_r^* = 1$ ve $N_{tu,0} = 1.5$ için).

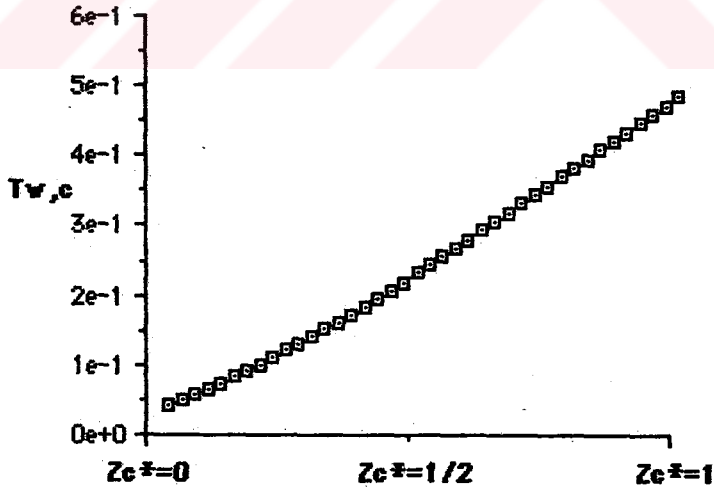


Şekil 4.3: Matris Üzerinde Sabit Bir Noktanın Sıcaklık Değişimi
($C^*=1.00$, $C_r^*=5$ ve $N_{w,o}=10$ için).

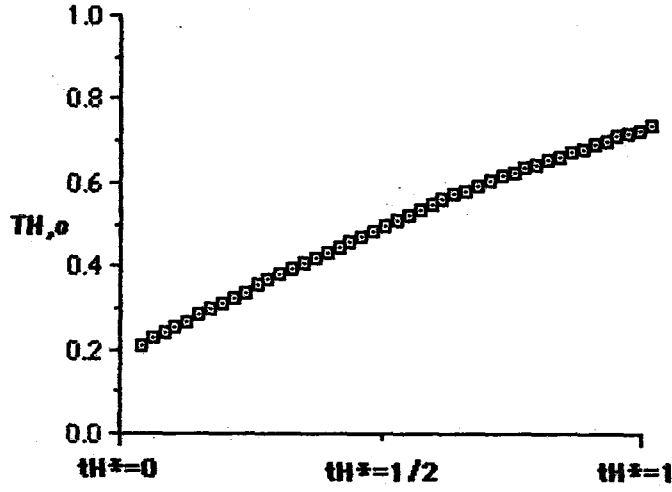
Bilgisayar programı her düğüm noktasındaki akışkan ve matris sıcaklıklarını vermektedir. $C^*=0.95$, $C_r^*=1$ ve $N_{w,o}=1.5$ değerleri için sıcak ve soğuk periyodların sonundaki, matris sıcaklık dağılımları Şekil 4.4 ve 4.5' de verilmiştir. Şekil 4.4' de sıcak periyod sonundaki matris sıcaklığının dağılımı rejeneratör ekseni boyunca düştüğü görülmektedir. Şekil 4.5' de bu durumun tersi söz konusudur. Rejeneratör çıkışındaki sıcak ve soğuk akışkan boyutsuz sıcaklıkları, boyutsuz zamanın fonksiyonu olarak Şekil 4.6 ve 4.7' de verilmiştir.



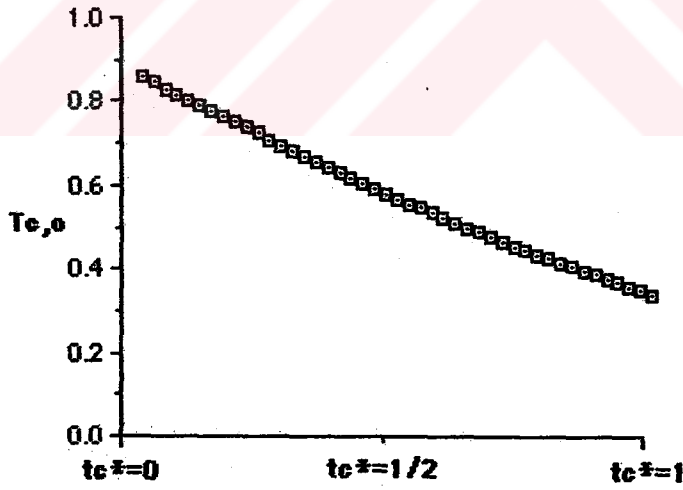
Şekil 4.4: Sıcak Peryod Sonunda Matris İçindeki Sıcaklık Dağılımı ($C^* = 0.95$, $C_r^* = 1$ ve $N_{tu,0} = 1.5$ için).



Şekil 4.5: Soğuk Peryod Sonunda Matris İçindeki Sıcaklık Dağılımı ($C^* = 0.95$, $C_r^* = 1$ ve $N_{tu,0} = 1.5$ için).

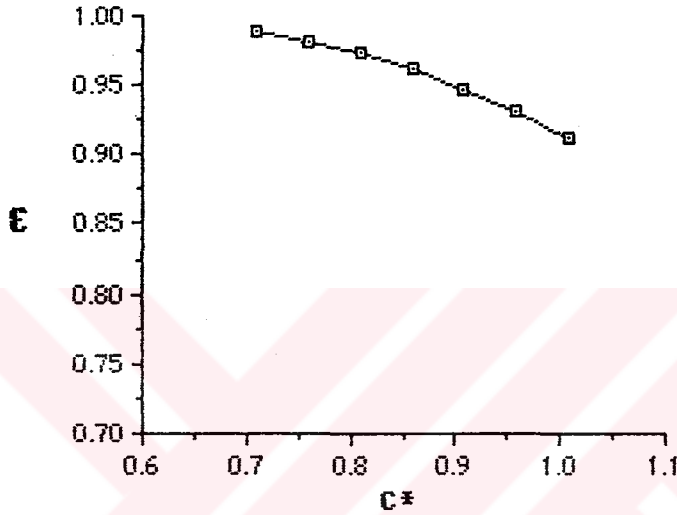


Şekil 4.6: Rejeneratörün Çıkışındaki Sıcak Akışkan Sıcaklığının Boyutsuz Zamana Göre Değişimi ($C^*=0.95$, $C_r^*=1$ ve $N_{tu,o}=1.5$ için).



Şekil 4.7: Rejeneratörün Çıkışındaki Soğuk Akışkan Sıcaklığının Boyutsuz Zamana Göre Değişimi ($C^*=0.95$, $C_r^*=1$ ve $N_{tu,o}=1.5$ için).

Akışkan boyutsuz kapasite debileri oranı C^* ın rejeneratör etkinliğine etkisi, $C_r^*=5$ ve $N_{tu,o}=10$ için incelenmiş ve elde edilen sonuçlar Şekil 4.8' de gösterilmiştir. Bu şekilde görüldüğü gibi, belli bir $N_{tu,o}$ ve C_r^* değeri için rejeneratör etkinliği, C^* ın azalan değerleri ile artmaktadır.



Şekil 4.8: Akışkanların Boyutsuz Kapasite Oranına Göre Rejeneratör Etkinlik Değerleri ($C_r^*=5$ ve $N_{tu,o}=10$ için).

4.2. Enerji Geri Kazanım Hesabı

Elazığ ilinde bulunan bir klima tesisi için enerji geri kazanım hesabı bu kısımda incelenecektir. İncelenecek olan klima tesisinin havalandırma kapasitesi $20.000 \text{ m}^3/\text{h}$ olup tesis %25 temiz hava kullanımlı olarak çalışmaktadır. Elazığ ilinde yaz ve kış için dış ortam sıcaklık değerleri meteoroloji müdürlüğünden alınmıştır.

Elazığ ili için yaz sezonu; Temmuz ve Ağustos aylarını kapsamaktadır. Bu dönemde rejeneratör 9⁰⁰ ile 20⁰⁰ saatleri arasında günde 12 saat çalıştırılmaktadır. Bu saatler arasında dış ortam ortalama sıcaklığı;

Temmuz ayı için : 32 °C

Ağustos ayı için : 30 °C

olmaktadır (Meteoroloji Müdürlüğü Tabloları, 1990).

Elazığ ili için kış sezonu; Kasım, Aralık, Ocak, Şubat ve Mart aylarını kapsamaktadır. Bu dönemde rejeneratör günde 24 saat çalıştırılmaktadır. Bu aylar için dış ortam ortalama sıcaklıkları aşağıdaki gibidir (Meteoroloji Müdürlüğü Tabloları, 1990).

Kasım ayı için : 7.6 °C

Aralık " " : 3.3 °C

Ocak " " : -5.2 °C

Şubat " " : -0.7 °C

Mart " " : 6.7 °C

Yaz ve kış ortamları için tasarım oda sıcaklık değerleri aşağıdaki gibi olmalıdır. Bu değerler iklimlendirme tablolarından alınmıştır (Genceli, 1976).

Yaz için:

Oda sıcaklığı: 22 °C

Kış için:

Oda sıcaklığı: 22 °C

Yukarıda verilen değerlere göre sistem için gerekli duyulur ısıyı hesaplırsak;

$$Q = m c_p \Delta t$$

Havanın;

$$\text{Yoğunluğu } \rho = 1.2 \text{ (kg/m}^3\text{)}$$

$$\text{Özgül ısısı } c_p = 1.0046 \text{ (kJ/kgK)}$$

Kütleli Debisi

$$\begin{aligned} m &= 20000 \times 0.25 \times 1.2 \times (1/3600) \\ &= 1.66 \text{ kg/s} \end{aligned}$$

olduğundan, bu değerler kullanılarak

Yaz şartlarında duyulur ısı yükü;

Temmuz ayı için,

$$\begin{aligned} Q_{\text{Temmuz}} &= 1.66 \times 1.0046 \times (32 - 22) \\ &= 16.67 \text{ KW} \end{aligned}$$

Ağustos ayı için,

$$\begin{aligned} Q_{\text{Ağustos}} &= 1.66 \times 1.0046 \times (30 - 22) \\ &= 13.33 \text{ KW} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Q_{\text{Yaz}} &= Q_{\text{Temmuz}} + Q_{\text{Ağustos}} \\ &= 16.67 + 13.33 \\ &= 30.00 \text{ KW} \end{aligned}$$

bulunur.

Kış şartlarında duyulur ısı yükü;

Kasım ayı için,

$$Q_{Kasım} = 1.66 \times 1.0046 \times (22 - 7.6)$$

$$= 24.02 \text{ KW}$$

Aralık ayı için,

$$Q_{Aralık} = 1.66 \times 1.0046 \times (22 - 3.3)$$

$$= 31.18 \text{ KW}$$

Ocak ayı için,

$$Q_{Ocak} = 1.66 \times 1.0046 \times (22 - (-5.2))$$

$$= 45.36 \text{ KW}$$

Şubat ayı için,

$$Q_{Şubat} = 1.66 \times 1.0046 \times (22 - (-0.7))$$

$$= 37.85 \text{ KW}$$

Mart ayı için,

$$Q_{Mart} = 1.66 \times 1.0046 \times (22 - 6.7)$$

$$= 25.51 \text{ KW}$$

$$Q_{1 \text{ Kış}} = Q_{Kasım} + Q_{Aralık} + Q_{Ocak} + Q_{Şubat} + Q_{Mart}$$

$$= 24.02 + 31.18 + 45.36 + 37.85 + 25.51$$

$$= 163.92 \text{ KW}$$

bulunur.

Bu havalandırma tesisatına rejeneratör yerleştirdikten sonra sistemin yaz ve kış tasarım şartlarında duyulur ısı yüklerini hesaplamak için,

| | |
|---------------------------------------|---------------|
| Akışkanların kapasite debileri | $C^* = 1$ |
| Matris kapasite oranı | $C_r^* = 2$ |
| Düzeltilmiş transfer birimleri sayısı | $N_{w,0} = 3$ |
| Isı taşınım kondüktans oranı | $(hA)^* = 1$ |

değerlerine sahip bir rejeneratör yerleştirdiğimizi düşünürsek, bu verilere göre bilgisayar programından hesaplanan değerler aşağıda verilmiştir.

Sıcak akışkanın boyutsuz çıkış sıcaklığı, $T_H^* = 0.272 (-)$

Soğuk akışkanın boyutsuz çıkış sıcaklığı, $T_c^* = 0.728 (-)$

Sıcak periyod sonunda matrisin ortalama

boyutsuz sıcaklığı, $T_w^* = 0.682 (-)$

Soğuk periyod sonunda matrisin ortalama

boyutsuz sıcaklığı, $T_w^* = 0.318 (-)$

Rejeneratör Etkinliği, $\epsilon = 0.728 (-)$

Bölüm 3' de denklem (3.27)' den;

Yaz iklimi için sıcak akışkanın çıkış sıcaklığı,

Temmuz ayı için,

$$0.272 = (T_H - 22) / (32 - 22)$$

$$T_H = 24.72 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Ağustos ayı için,

$$0.272 = (T_H - 22) / (30 - 22)$$

$$T_H = 24.18 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Kış ısıtması için soğuk akışkanın çıkış sıcaklığı,

Kasım ayı için,

$$0.728 = (T_c - 7.6)/(22 - 7.6)$$

$$T_c = 18.08 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Aralık ayı için,

$$0.728 = (T_c - 3.3)/(22 - 3.3)$$

$$T_c = 16.91 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Ocak ayı için,

$$0.728 = (T_c - (-5.2))/(22 - (-5.2))$$

$$T_c = 14.60 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Şubat ayı için,

$$0.728 = (T_c - (-0.7))/(22 - (-0.7))$$

$$T_c = 15.82 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Mart ayı için,

$$0.728 = (T_c - 6.7)/(22 - 6.7)$$

$$T_c = 17.83 \text{ } ^\circ\text{C}$$

bulunur. Bu değerler kullanılarak;

Yaz şartlarında havalandırma için gerekli tasarım duyulur ısı yükü,

Temmuz ayı için,

$$Q_{\text{Temmuz}} = 1.66 \times 1.0046 \times (24.72 - 22)$$

$$= 4.54 \text{ KW}$$

Ağustos ayı için,

$$\begin{aligned} Q_{\text{Ağustos}} &= 1.66 \times 1.0046 \times (24.18 - 22) \\ &= 3.63 \text{ KW} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Q_{\text{2 Yaz}} &= Q_{\text{Temmuz}} + Q_{\text{Ağustos}} \\ &= 4.54 + 3.63 \\ &= 8.17 \text{ KW} \end{aligned}$$

Kış şartlarında havalandırma için gerekli tasarım duyulur ısı yükü,

Kasım ayı için,

$$\begin{aligned} Q_{\text{Kasım}} &= 1.66 \times 1.0046 \times (22 - 18.08) \\ &= 6.53 \text{ KW} \end{aligned}$$

Aralık ayı için,

$$\begin{aligned} Q_{\text{Aralık}} &= 1.66 \times 1.0046 \times (22 - 16.91) \\ &= 8.49 \text{ KW} \end{aligned}$$

Ocak ayı için,

$$\begin{aligned} Q_{\text{Ocak}} &= 1.66 \times 1.0046 \times (22 - 14.60) \\ &= 12.34 \text{ KW} \end{aligned}$$

Şubat ayı için,

$$\begin{aligned} Q_{\text{Şubat}} &= 1.66 \times 1.0046 \times (22 - 15.82) \\ &= 10.30 \text{ KW} \end{aligned}$$

Mart ayı için,

$$\begin{aligned} Q_{\text{Mart}} &= 1.66 \times 1.0046 \times (22 - 17.83) \\ &= 6.95 \text{ KW} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 Q_{2 \text{ Kış}} &= Q_{\text{Kasım}} + Q_{\text{Aralık}} + Q_{\text{Ocak}} + Q_{\text{Şubat}} + Q_{\text{Mart}} \\
 &= 6.53 + 8.49 + 12.34 + 10.30 + 6.95 \\
 &= 44.61 \text{ KW}
 \end{aligned}$$

Bu sonuçlara göre;

Yaz şartlarında geri kazanılan duyulur ısı miktarı,

$$\Delta Q = Q_{1 \text{ Yaz}} - Q_{2 \text{ Yaz}}$$

$$\Delta Q = 30.00 - 8.17$$

$$\Delta Q = 21.83 \text{ KW}$$

Kış şartlarında geri kazanılan duyulur ısı miktarı,

$$\Delta Q = Q_{1 \text{ Kış}} - Q_{2 \text{ Kış}}$$

$$\Delta Q = 163.92 - 44.61$$

$$\Delta Q = 119.31 \text{ KW}$$

bulunur.

Isı yüklerindeki bu azalmanın sağlayacağı yıllık yarar ise şu şekilde hesaplanabilir. Yaz süresi günde 12 saatten ayda 360 saat, kış süresi günde 24 saatten ayda 720 saat olarak kabul edilirse ve enerjinin KW-Saat fiyatı yaz için 600 TL (Elektrik), kış için 150 TL (Fuel-oil) kabul edilirse yaklaşık bir sezonluk tasarruf hesaplanabilir.

Yaz için yıllık enerji tasarrufu;

$$Q_T = 21.83 \times 360$$

$$Q_T = 7859 \text{ KW}$$

$$\text{Tutarı} = 7859 \times 600$$

$$\text{Tutarı} = 4\,715\,000 \text{ TL}$$

Kış için yıllık enerji tasarrufu;

$$Q_T = 119.31 \times 720$$

$$Q_T = 85903 \text{ KW}$$

$$\text{Tutarı} = 85903 \times 150$$

$$\text{Tutarı} = 12\,880\,000 \text{ TL}$$

bulunur.

Rejeneratörler güçleri 0.5 KW' a yaklaşan elektrik motorlarıyla tahrik edilmektedir. Rejeneratör matrisini döndürmek için, tüketilen yıllık enerji miktarı;

$$Q_R = 0.5 \times (360 + 720)$$

$$Q_R = 540 \text{ KW}$$

$$\text{Tutarı} = 540 \times 600$$

$$\text{Tutarı} = 324\,000 \text{ TL}$$

bulunur.

Yıllık toplam enerji tasarrufu;

$$\text{Tutarı} = 4\,715\,000 + 12\,880\,000 - 324\,000$$

$$\text{Tutarı} = 17\,271\,000 \text{ TL}$$

bulunur.

İncelenen örnekte sadece duyulur ısının geri kazanılmasıyla yılda yaklaşık 17.2 milyon TL tasarruf sağlanmaktadır. $C^*=1$, $C_r^*=2$, $N_{w,o}=3$ ve $(hA)^*=1$ şartlarını sağlayan dönel rejeneratörün İstanbul teslimi 1991 fiyatlarıyla yaklaşık 30 000 SEK (İsveç Kronu) yani 26 milyon TL civarındadır. Bu örnekteki rejeneratör kullanılarak ısı geri kazanımı yapıldığında cihaz için yapılan yatırım yaklaşık 1.5 yılda amorti edecektir.



KAYNAKLAR

- ATTHEY, D.R., (1988). "An Approximate Thermal Analysis for A Regenerative Heat Exchanger". **Int. Journal Heat Mass Transfer**, Vol.31, pp.1431-1441.
- BAHNKE, G.D., and HOWARD, C.P., (1964). "The Effect of Longitudinal Heat Conduction on Periodic-Flow Heat Exchanger Performance". **Transactions of the ASME**, Vol.86, pp.105-120.
- COPPAGE, J.E., and LONDON, A.L., (1953). "The Periodic-Flow Rejenerator-A Summary of Design Theory". **Transactions of the ASME**, Vol.75, pp.779-787.
- DAĞSÖZ, A. K., (1985). **Isı Değiştiricileri**, İ.T.Ü. Makina Fakültesi.
- DUSİNBERRE, G.M., (1961). **Heat-Transfer Calculations by Finite Differences**, International Textbook Company, Scranton, Pennsylvania.
- FRAAS, A.P., ÖZİŞİK, M.N., (1965). **Heat Exchanger Design**, John Wiley and Sons Inc., New York.
- GENCELİ, O.F., (1983). **Isı Eşanjörleri Ders Notları**, U. Ü. Mühendislik Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümü.
- GENCELİ, O.F., (1984). **İklimlendirme Esasları**, Teknik Üniversite Matbaası, İstanbul.
- GENCELİ, O.F., (1976). **Isıtma-Havalandırma ve İklimlendirme Yardımcı Tabloları**, Teknik Üniversite Matbaası, İstanbul.
- HARPER, D.B., and ROHSENOW, W.M., (1953). "Effect of Rotary Rejenerator Performance on Gas-Turbine-Plant Performance". **Transactions of the ASME**, Vol.75, pp.759-765.

- HILL, A., and WILLMOTT, A.J., (1987). "A Robust Method for Regenerative Heat Exchanger Calculations". **Int. Journal of Heat Mass Transfer**, Vol.30, pp.241-249.
- JAKOP, M., (1957). **Heat Transfer**, John Wiley and Sons Inc., Vol.2, pp.261-341, New York.
- KAKAÇ, S., and YENER, Y., (1980). **Convective Heat Transfer**, Middle East Technical University, Pub. No. 65, Ankara.
- KAYS, W.M., and LONDON, A.L., (1964). **Compact Heat Exchangers**, 2nd Ed., McGraw-Hill Book Company. New York.
- KAYS, W. M., (1972). **Heat Exchangers**, AGARD Lecture Series, No. 57, Edited by J. J. Ginoux, London.
- KAYS, W.M., (1950). "An Investigation of Losses of Flow Stream Mechanical Energy at Abrupt Changes in Flow Cross Section". **Transactions of the ASME**, Vol.72, pp.1067-1074.
- LAI, S., DUDUKOVIC, M.P., and RAMACHANDRAN, P.A., (1987). "Cells-In-Series Method for Simulation of Heat Regenerators in Periodic Operation". **Numerical Heat Transfer**, Vol.11, pp.125-141.
- LAMBERTSON, T.J., (1958). "Performance Factors of a Periodic-Flow Heat Exchanger". **Transactions of the ASME**, Vol.80, pp.586-591.
- LEERSUM, J.G., and AMBROSE, C.W., (1981). "Comparisons between Experiments and a Theoretical Model of Heat and Mass Transfer in Rotary Regenerators with Nonsorbing Matrices". **Journal of Heat Transfer**, Vol.103, pp.189-194.
- LONDON, A.L., SAMPSELL, D.F., and GOWAN, J.G., (1964). "The Transient Response of Gas Turbine Plant Heat Exchangers-Additional Solutions for Rejenerators of the Priodic-Flow and Direct-Transfer Types". **Journal of Engineering for Power**, pp.127-135.

- LONDON, A.L., and SHAH, R.K., (1973). "Glass-Ceramic Hexagonal and Circular Passage Surfaces - Heat Transfer and Flow Friction Desing Characteristics". **SAE-Transactions**, Vol.82, pp.425-434.
- LONDON, A.L., (1964). "Compact Heat Exchangers - Part:2 Surface Geometry". **Mecanical Engineering**, pp.31-35.
- LONDON, A.L., YOUNG, M.B.D., and STANG, J.H., (1970). "Glass Ceramic Surfaces, Straight Triangular Passages - Heat and Flow Friction Characteristics", **Journal of Engineering for Power**, Vol.92, pp.381-389.
- ONAT, K., (1978). **Isı Değiştirgeçleri Ders Notları**, İ.T.Ü. Makina Fakültesi.
- REAY, D.A., (1981). "A Review of Gas-Gas Heat Recovery Systems". **Journal of Heat Recovery System**, Vol.1, pp.3-11.
- ROMIE, F.E., (1990). "Response of Rotary Regenerators to Step Changes in Mass Rates". **Journal of Heat Transfer**, Vol.30, pp.43-48.
- ROMIE, F.E., (1990). "A Table of Regenerator Effectiveness". **Journal of Heat Transfer**, Vol.112 pp.497-499.
- SAN, J.Y., WOREK, W.M., and LAVAN, Z., (1987). "Second-Law Analysis of a Two-Dimensional Regenerator". **Energy**, Vol.12, pp.485-496.
- SKIEPKO, T., (1988). "The Effect of Matrix Longitudinal Heat Conduction on the Temperature Fields in the Rotary Heat Exchanger". **Int. Journal of Heat Mass Transfer**, Vol.31, pp.2227-2238.
- ÜNSAL, M., (1980). **Solar Tables**, Ortadoğu Teknik Üniversitesi.
- WILLMOTT, A.J., (1969). "The Regenerative Heat Exchanger Computer Representation". **Int. Journal of Heat Mass Transfer**, Vol.12, pp.997-1014.

Wyllen, G.J.V., and SONNTAG, R.E., (1978). **Fundamentals of Classical Thermodynamics**, 2nd Ed., Macmillan Publishing Co. Inc., New York.





```

C *****
C *BU PROGRAM DONEL-REJENERATIF ISI DEGISTIRICILERININ ETKENLIGINI
C *AKISKAN SICAKLIGINI VE MATRIS SICAKLIGINI SONLU FARKLAR YONTEMI
C *ILE HESAPLAR
C *Z:SICAK PERYOD ICIN ZAMAN EKSENI BOYUNCA DUGUM NOKTALARI SAYISI
C *Y:SOGUK PERYOD ICIN ZAMAN EKSENI BOYUNCA DUGUM NOKTALARI SAYISI
C *P:REJENERATOR EKSENI BOYUNCA DUGUM NOKTALARI SAYISI
C *CS:AKISKANLARIN ISI KAPASITE ORANI, CS=CMIN/CMAX
C *CRS:MATRISIN ISI KAPASITE ORANI, CRS=CR/CMIN
C *NTO:DUZELTILMIS TRANSFER UNITELEI SAYISI
C *NTH:SICAK TARAF ICIN TRANSFER UNITELEI SAYISI
C *NTC:SOGUK TARAF ICIN TRANSFER UNITELEI SAYISI
C *HA:ISI TASINIM KONDUKTANS ORANI, HA=(HA)MIN/(HA)MAX
C *****
  INTEGER S,R,A,Z,P,Y,B
  REAL K1,K2,K3,K4,NTH,NTC,I,NTD
  DATA Z,P,Y/45,40,45/
  DIMENSION W(100,100),H(100,100),C(100,100),D(100,100)
  DT=1./(Z-1)
  DV=1./(Y-1)
  DZ=1./(P-1)
  DATA CS,CRS,HA/1.00,5.00,1.0/
5  FORMAT(30X,'SICAK AKISKAN SICAKLIGI',2X,'S=',I2)
7  FORMAT(30X,'SICAK TARAFDAKI MATRIS SICAKLIGI')
8  FORMAT(30X,'SOGUK AKISKAN SICAKLIGI',2X,'S=',I2)
9  FORMAT(30X,'SOGUK TARAFDAKI MATRIS SICAKLIGI')
  DO 925 B=1,20
  NTD=B*0.5
  NTH=CS*NTD*(1.+1./HA)
  NTC=NTC*(1.+HA)
  A=0
C  C(1,S):SOGUK AKISKAN GIRIS SICAKLIGI
  DO 15 S=1,Y
  C(1,S)=0.0
15 CONTINUE
  I=0.0
C  SICAK PERYOD BASLANGIC. MATRISIN ILK SICAKLIK DAGILIMI:W(R,1)=0
  DO 20 R=1,P
  W(R,1)=0.0
20 CONTINUE
C  H(1,S):SICAK AKISKAN GIRIS SICAKLIGI
25 DO 30 S=1,Z
  H(1,S)=1.
30 CONTINUE
C  DIFERANSIYEL DENKLEMLERIN COZUMU
  DO 600 L=1,500
C32 WRITE(3,35) L
C35 FORMAT(50X,'L=',I3)
C  SICAK TARAF ICIN SABIT FAKTORLERIN COZUMU
37 A1=(2.-NTH*DZ)/(2.+NTH*DZ)
  A2=(NTH*DZ)/(2.+NTH*DZ)
  DH=1.-(A2*DT*NTH)/(2.*CS*CRS)+(DT*NTH)/(2.*CS*CRS)
  K1=(1.-(DT*NTH)/(2.*CS*CRS))/DH
  K2=((DT*NTH)/(2.*CS*CRS))/DH
  K3=((A2*DT*NTH)/(2.*CS*CRS))/DH

```

```

K4=((DT*NTH*A1)/(2.*CS*CRS))/DH
C H(J,S):(J,S) POZISYONUNDAKI SICAK AKISKAN SICAKLIGI
DO 40 J=2,P
H(J,1)=A1*H(J-1,1)+A2*(H(J,1)+H(J-1,1))
40 CONTINUE
B1=(1.-(DT*NTH)/(2.*CS*CRS))/(1.+(DT*NTH)/(2.*CS*CRS))
B2=((DT*NTH)/(2.*CS*CRS))/(1.+(DT*NTH)/(2.*CS*CRS))
DO 70 S=1,(Z-1)
W(1,S+1)=2.*B2+B1*W(1,S)
C W(J,S):(J,S) POZISYONUNDAKI SICAK DUVAR SICAKLIGI
DO 60 J=1,(P-1)
H(J+1,S+1)=K1*W(J+1,S)+K2*H(J+1,S)+K3*W(J,S+1)+K4*H(J,S+1)
H(J+1,S+1)=A1*H(J,S+1)+A2*(W(J+1,S+1)+W(J,S+1))
IF(S.EQ.(Z-1)) GO TO 51
GO TO 60
C EKSENEL KORDINATLAR ICIN ORJININ DEGISTIRILMESI
C D(J,S):(J,S) POZISYONUNDAKI SOGUK MATRIS SICAKLIGI
51 D(P,1)=W(1,Z)
55 D(P-J,1)=W(J+1,Z)
60 CONTINUE
70 CONTINUE
IF(A.NE.L1) GO TO 95
WRITE(3,5) S
WRITE(3,75) ((H(J,S),J=1,P),S=1,Z)
75 FORMAT(7(2X,F9.6))
WRITE(3,7)
WRITE(3,80) ((W(J,S),J=1,P),S=1,Z)
80 FORMAT(7(2X,F9.6))
TW=W(1,Z)
DO 83 J=2,(P-1)
TW=TW+2.*W(J,Z)
83 CONTINUE
TW=(TW+W(P,Z))*DZ/2.
87 HO=H(P,1)
DO 90 S=2,(Z-1)
HO=2.*H(P,S)+HO
90 CONTINUE
HO=(HO+H(P,Z))*DT/2.
C SOGUK TARAF ICIN SABIT FAKTORLERIN COZUMU
95 A1=(2.-NTC*DZ)/(2.+NTC*DZ)
A2=(NTC*DZ)/(2.+NTC*DZ)
DC=1.-(A2*DV*NTC)/(2.*CRS)+(DV*NTC)/(2.*CRS)
<1=(1.-(DV*NTC)/(2.*CRS))/DC
<2=((DV*NTC)/(2.*CRS))/DC
<3=((A2*DV*NTC)/(2.*CRS))/DC
K4=((DV*NTC*A1)/(2.*CRS))/DC
DO 100 J=2,P
C C(J,S):(J,S) POZISYONUNDAKI SOGUK AKISKAN SICAKLIGI
C(J,1)=A1*C(J-1,1)+A2*(D(J,1)+D(J-1,1))
100 CONTINUE
B1=(1.-(DV*NTC)/(2.*CRS))/(1.+(DV*NTC)/(2.*CRS))
B2=((DV*NTC)/(2.*CRS))/(1.+(DV*NTC)/(2.*CRS))
DO 500 S=1,(Y-1)
D(1,S+1)=B1*D(1,S)
DO 400 J=1,(P-1)

```



```

D(J+1,S+1)=K1*D(J+1,S)+K2*C(J+1,S)+K3*D(J,S+1)+K4*C(J,S+1)
C(J+1,S+1)=A1*C(J,S+1)+A2*(D(J+1,S+1)+D(J,S+1))
IF(S.EQ.(Y-1)) GO TO 200
GO TO 400
200 W(P,1)=D(1,Y)
W(P-J,1)=D(J+1,Y)
400 CONTINUE
500 CONTINUE
IF(A.NE.L) GO TO 520
WRITE(3,8) S
WRITE(3,75) ((C(J,S),J=1,P),S=1,Y)
WRITE(3,9)
WRITE(3,80) ((D(J,S),J=1,P),S=1,Y)
TD=D(1,Y)
DO 512 J=2,(P-1)
TD=TD+2.*D(J,Y)
512 CONTINUE
TD=(TD+D(P,Y))*DZ/2.
520 CO=C(P,1)
DO 530 S=2,(Y-1)
CO=CO+2.*C(P,S)
530 CONTINUE
CO=(CO+C(P,Y))*DV/2.
IF (A.NE.L) GO TO 540
HE=(1.-HU)/CS
WRITE(3,535) CS,CRS,HA,NTQ,L,HO,CO,TW,TD,HE,CO
535 FORMAT(5X,'CS=',F4.2,3X,'CRS=',F4.2,3X,'HA=',F3.1,3X,'NTQ=',F
*3X,'ITERASYON SAYISI=',I3,/,5X,'SICAK AKISKANIN ORTALAMA CIKIS ',
*'SICAKLIGI=',F9.6,/,5X,'SOGUK AKISKANIN ORTALAMA CIKIS ',
*'SICAKLIGI=',F9.6,/,5X,'SICAK PERYOD SONUNDA MATRIS ORTALAMA ',
*'SICAKLIGI=',F9.6,/,5X,'SOGUK PERYOD SONUNDA MATRIS ORTALAMA ',
*'SICAKLIGI=',F9.6,/,5X,'HE=',F9.6,2X,'REJENERATOR ETKENLIGI='
*F9.6,/)
IF(A.EQ.L) GO TO 925
540 E=ABS(CO-I)
C PERYODIK CALISMA KONTROLU
IF(E.LT.0.0001) A=L
I=CO
IF(A.EQ.L) GO TO 37
600 CONTINUE
925 CONTINUE
950 STJP
END

```

CS=0.95 CRS=1.00 HA=1.0 NTO= 1.50 ITERASYON SAYISI= 1
 SICAK AKISKANIN ORTALAMA CIKIS SICAKLIGI= 0.340089
 SOGUK AKISKANIN ORTALAMA CIKIS SICAKLIGI= 0.497322
 SICAK PERYOD SONUNDA MATRIS ORTALAMA SICAKLIGI= 0.694645
 SOGUK PERYOD SONUNDA MATRIS ORTALAMA SICAKLIGI= 0.197332
 HE= 0.694643 REJENERATOR ETKENLIGI= 0.497322

CS=0.95 CRS=1.00 HA=1.0 NTO= 1.50 ITERASYON SAYISI= 2
 SICAK AKISKANIN ORTALAMA CIKIS SICAKLIGI= 0.453495
 SOGUK AKISKANIN ORTALAMA CIKIS SICAKLIGI= 0.546598
 SICAK PERYOD SONUNDA MATRIS ORTALAMA SICAKLIGI= 0.772607
 SOGUK PERYOD SONUNDA MATRIS ORTALAMA SICAKLIGI= 0.226019
 HE= 0.575269 REJENERATOR ETKENLIGI= 0.546598

CS=0.95 CRS=1.00 HA=1.0 NTO= 1.50 ITERASYON SAYISI= 3
 SICAK AKISKANIN ORTALAMA CIKIS SICAKLIGI= 0.470713
 SOGUK AKISKANIN ORTALAMA CIKIS SICAKLIGI= 0.553160
 SICAK PERYOD SONUNDA MATRIS ORTALAMA SICAKLIGI= 0.783171
 SOGUK PERYOD SONUNDA MATRIS ORTALAMA SICAKLIGI= 0.230021
 HE= 0.557145 REJENERATOR ETKENLIGI= 0.553160

CS=0.95 CRS=1.00 HA=1.0 NTO= 1.50 ITERASYON SAYISI= 4
 SICAK AKISKANIN ORTALAMA CIKIS SICAKLIGI= 0.473126
 SOGUK AKISKANIN ORTALAMA CIKIS SICAKLIGI= 0.554066
 SICAK PERYOD SONUNDA MATRIS ORTALAMA SICAKLIGI= 0.784632
 SOGUK PERYOD SONUNDA MATRIS ORTALAMA SICAKLIGI= 0.230576
 HE= 0.554604 REJENERATOR ETKENLIGI= 0.554066

CS=0.95 CRS=1.00 HA=1.0 NTO= 1.50 ITERASYON SAYISI= 5
 SICAK AKISKANIN ORTALAMA CIKIS SICAKLIGI= 0.473461
 SOGUK AKISKANIN ORTALAMA CIKIS SICAKLIGI= 0.554191
 SICAK PERYOD SONUNDA MATRIS ORTALAMA SICAKLIGI= 0.784833
 SOGUK PERYOD SONUNDA MATRIS ORTALAMA SICAKLIGI= 0.230653
 HE= 0.554251 REJENERATOR ETKENLIGI= 0.554191

CS=0.95 CRS=1.00 HA=1.0 NTO= 1.50 ITERASYON SAYISI= 6
 SICAK AKISKANIN ORTALAMA CIKIS SICAKLIGI= 0.473508
 SOGUK AKISKANIN ORTALAMA CIKIS SICAKLIGI= 0.554208
 SICAK PERYOD SONUNDA MATRIS ORTALAMA SICAKLIGI= 0.784862
 SOGUK PERYOD SONUNDA MATRIS ORTALAMA SICAKLIGI= 0.230664
 HE= 0.554202 REJENERATOR ETKENLIGI= 0.554203

CS=0.95 CRS=1.00 HA=1.0 NTO= 1.50 ITERASYON SAYISI= 6
 SICAK AKISKANIN ORTALAMA CIKIS SICAKLIGI= 0.473514
 SOGUK AKISKANIN ORTALAMA CIKIS SICAKLIGI= 0.554211
 SICAK PERYOD SONUNDA MATRIS ORTALAMA SICAKLIGI= 0.784865
 SOGUK PERYOD SONUNDA MATRIS ORTALAMA SICAKLIGI= 0.230665
 HE= 0.554195 REJENERATOR ETKENLIGI= 0.554211

CS=0.95 CRS=5.00 HA=1.0 NTO= 1.50 ITERASYON SAYISI= 1
 SICAK AKISKANIN ORTALAMA CIKIS SICAKLIGI= 0.110736
 SDGJK AKISKANIN ORTALAMA CIKIS SICAKLIGI= 0.231698
 SICAK PERYOD SONUNDA MATRIS ORTALAMA SICAKLIGI= 0.187211
 SDGUK PERYOD SONUNDA MATRIS ORTALAMA SICAKLIGI= 0.140871
 HE= 0.936067 REJENERATOR ETKENLIGI= 0.231698

CS=0.95 CRS=5.00 HA=1.0 NTO= 1.50 ITERASYON SAYISI= 2
 SICAK AKISKANIN ORTALAMA CIKIS SICAKLIGI= 0.194191
 SDGJK AKISKANIN ORTALAMA CIKIS SICAKLIGI= 0.365909
 SICAK PERYOD SONUNDA MATRIS ORTALAMA SICAKLIGI= 0.310511
 SDGUK PERYOD SONUNDA MATRIS ORTALAMA SICAKLIGI= 0.237331
 HE= 0.848220 REJENERATOR ETKENLIGI= 0.365909

CS=0.95 CRS=5.00 HA=1.0 NTO= 1.50 ITERASYON SAYISI= 3
 SICAK AKISKANIN ORTALAMA CIKIS SICAKLIGI= 0.259269
 SDGJK AKISKANIN ORTALAMA CIKIS SICAKLIGI= 0.448034
 SICAK PERYOD SONUNDA MATRIS ORTALAMA SICAKLIGI= 0.393270
 SDGUK PERYOD SONUNDA MATRIS ORTALAMA SICAKLIGI= 0.303657
 HE= 0.779717 REJENERATOR ETKENLIGI= 0.448034

CS=0.95 CRS=5.00 HA=1.0 NTO= 1.50 ITERASYON SAYISI= 4
 SICAK AKISKANIN ORTALAMA CIKIS SICAKLIGI= 0.307584
 SDGJK AKISKANIN ORTALAMA CIKIS SICAKLIGI= 0.500474
 SICAK PERYOD SONUNDA MATRIS ORTALAMA SICAKLIGI= 0.449427
 SDGJK PERYOD SONUNDA MATRIS ORTALAMA SICAKLIGI= 0.349337
 HE= 0.728859 REJENERATOR ETKENLIGI= 0.500474

CS=0.95 CRS=5.00 HA=1.0 NTO= 1.50 ITERASYON SAYISI= 5
 SICAK AKISKANIN ORTALAMA CIKIS SICAKLIGI= 0.342447
 SDGUK AKISKANIN ORTALAMA CIKIS SICAKLIGI= 0.534811
 SICAK PERYOD SONUNDA MATRIS ORTALAMA SICAKLIGI= 0.487767
 SDGUK PERYOD SONUNDA MATRIS ORTALAMA SICAKLIGI= 0.380811
 HE= 0.692161 REJENERATOR ETKENLIGI= 0.534811

CS=0.95 CRS=5.00 HA=1.0 NTO= 1.50 ITERASYON SAYISI= 6
 SICAK AKISKANIN ORTALAMA CIKIS SICAKLIGI= 0.357173
 SDGUK AKISKANIN ORTALAMA CIKIS SICAKLIGI= 0.557725
 SICAK PERYOD SONUNDA MATRIS ORTALAMA SICAKLIGI= 0.514036
 SDGUK PERYOD SONUNDA MATRIS ORTALAMA SICAKLIGI= 0.402497
 HE= 0.668134 REJENERATOR ETKENLIGI= 0.557725

CS=0.95 CRS=5.00 HA=1.0 NTO= 1.50 ITERASYON SAYISI= 7
 SICAK AKISKANIN ORTALAMA CIKIS SICAKLIGI= 0.384522
 SDGUK AKISKANIN ORTALAMA CIKIS SICAKLIGI= 0.573195
 SICAK PERYOD SONUNDA MATRIS ORTALAMA SICAKLIGI= 0.532070
 SDGUK PERYOD SONUNDA MATRIS ORTALAMA SICAKLIGI= 0.417438
 HE= 0.647371 REJENERATOR ETKENLIGI= 0.573195

CS=0.95 CRS=5.00 HA=1.0 NTO= 1.50 ITERASYON SAYISI= 8
 SICAK AKISKANIN ORTALAMA CIKIS SICAKLIGI= 0.396613
 SDGUK AKISKANIN ORTALAMA CIKIS SICAKLIGI= 0.583715
 SICAK PERYOD SONUNDA MATRIS ORTALAMA SICAKLIGI= 0.544465
 SDGUK PERYOD SONUNDA MATRIS ORTALAMA SICAKLIGI= 0.427729
 HE= 0.635144 REJENERATOR ETKENLIGI= 0.583715

CS=0.95 CRS=5.00 HA=1.0 NTO= 1.50 ITERASYON SAYISI= 9
 SICAK AKISKANIN ORTALAMA CIKIS SICAKLIGI= 0.405002
 SOGUK AKISKANIN ORTALAMA CIKIS SICAKLIGI= 0.590904
 SICAK PERYOD SONUNDA MATRIS ORTALAMA SICAKLIGI= 0.552991
 SOGUK PERYOD SONUNDA MATRIS ORTALAMA SICAKLIGI= 0.434817
 HE= 0.626314 REJENERATOR ETKENLIGI= 0.590904

CS=0.95 CRS=5.00 HA=1.0 NTO= 1.50 ITERASYON SAYISI= 10
 SICAK AKISKANIN ORTALAMA CIKIS SICAKLIGI= 0.410807
 SOGUK AKISKANIN ORTALAMA CIKIS SICAKLIGI= 0.595828
 SICAK PERYOD SONUNDA MATRIS ORTALAMA SICAKLIGI= 0.558857
 SOGUK PERYOD SONUNDA MATRIS ORTALAMA SICAKLIGI= 0.439692
 HE= 0.620204 REJENERATOR ETKENLIGI= 0.595828

CS=0.95 CRS=5.00 HA=1.0 NTO= 1.50 ITERASYON SAYISI= 11
 SICAK AKISKANIN ORTALAMA CIKIS SICAKLIGI= 0.414816
 SOGUK AKISKANIN ORTALAMA CIKIS SICAKLIGI= 0.599209
 SICAK PERYOD SONUNDA MATRIS ORTALAMA SICAKLIGI= 0.562894
 SOGUK PERYOD SONUNDA MATRIS ORTALAMA SICAKLIGI= 0.440059
 HE= 0.615983 REJENERATOR ETKENLIGI= 0.599209

CS=0.95 CRS=5.00 HA=1.0 NTO= 1.50 ITERASYON SAYISI= 12
 SICAK AKISKANIN ORTALAMA CIKIS SICAKLIGI= 0.417582
 SOGUK AKISKANIN ORTALAMA CIKIS SICAKLIGI= 0.601531
 SICAK PERYOD SONUNDA MATRIS ORTALAMA SICAKLIGI= 0.565673
 SOGUK PERYOD SONUNDA MATRIS ORTALAMA SICAKLIGI= 0.445374
 HE= 0.613071 REJENERATOR ETKENLIGI= 0.601531

CS=0.95 CRS=5.00 HA=1.0 NTO= 1.50 ITERASYON SAYISI= 13
 SICAK AKISKANIN ORTALAMA CIKIS SICAKLIGI= 0.419490
 SOGUK AKISKANIN ORTALAMA CIKIS SICAKLIGI= 0.603128
 SICAK PERYOD SONUNDA MATRIS ORTALAMA SICAKLIGI= 0.567586
 SOGUK PERYOD SONUNDA MATRIS ORTALAMA SICAKLIGI= 0.446967
 HE= 0.611003 REJENERATOR ETKENLIGI= 0.603128

CS=0.95 CRS=5.00 HA=1.0 NTO= 1.50 ITERASYON SAYISI= 14
 SICAK AKISKANIN ORTALAMA CIKIS SICAKLIGI= 0.420903
 SOGUK AKISKANIN ORTALAMA CIKIS SICAKLIGI= 0.604228
 SICAK PERYOD SONUNDA MATRIS ORTALAMA SICAKLIGI= 0.568903
 SOGUK PERYOD SONUNDA MATRIS ORTALAMA SICAKLIGI= 0.448064
 HE= 0.609631 REJENERATOR ETKENLIGI= 0.604228

CS=0.95 CRS=5.00 HA=1.0 NTO= 1.50 ITERASYON SAYISI= 15
 SICAK AKISKANIN ORTALAMA CIKIS SICAKLIGI= 0.421708
 SOGUK AKISKANIN ORTALAMA CIKIS SICAKLIGI= 0.604984
 SICAK PERYOD SONUNDA MATRIS ORTALAMA SICAKLIGI= 0.569809
 SOGUK PERYOD SONUNDA MATRIS ORTALAMA SICAKLIGI= 0.448820
 HE= 0.608728 REJENERATOR ETKENLIGI= 0.604984

CS=0.95 CRS=5.00 HA=1.0 NTO= 1.50 ITERASYON SAYISI= 16
 SICAK AKISKANIN ORTALAMA CIKIS SICAKLIGI= 0.422332
 SOGUK AKISKANIN ORTALAMA CIKIS SICAKLIGI= 0.605505
 SICAK PERYOD SONUNDA MATRIS ORTALAMA SICAKLIGI= 0.570434
 SOGUK PERYOD SONUNDA MATRIS ORTALAMA SICAKLIGI= 0.449340
 HE= 0.608072 REJENERATOR ETKENLIGI= 0.605505

CS=0.95 CRS=5.00 HA=1.0 NTU= 1.50 ITERASYON SAYISI= 17
 SICAK AKISKANIN ORTALAMA CIKIS SICAKLIGI= 0.422761
 SOGUK AKISKANIN ORTALAMA CIKIS SICAKLIGI= 0.605863
 SICAK PERYOD SONUNDA MATRIS ORTALAMA SICAKLIGI= 0.570863
 SOGUK PERYOD SONUNDA MATRIS ORTALAMA SICAKLIGI= 0.449698
 HE= 0.607620 REJENERATOR ETKENLIGI= 0.605063

CS=0.95 CRS=5.00 HA=1.0 NTU= 1.50 ITERASYON SAYISI= 18
 SICAK AKISKANIN ORTALAMA CIKIS SICAKLIGI= 0.423057
 SOGUK AKISKANIN ORTALAMA CIKIS SICAKLIGI= 0.606109
 SICAK PERYOD SONUNDA MATRIS ORTALAMA SICAKLIGI= 0.571160
 SOGUK PERYOD SONUNDA MATRIS ORTALAMA SICAKLIGI= 0.449945
 HE= 0.607308 REJENERATOR ETKENLIGI= 0.605109

CS=0.95 CRS=5.00 HA=1.0 NTU= 1.50 ITERASYON SAYISI= 19
 SICAK AKISKANIN ORTALAMA CIKIS SICAKLIGI= 0.423260
 SOGUK AKISKANIN ORTALAMA CIKIS SICAKLIGI= 0.606279
 SICAK PERYOD SONUNDA MATRIS ORTALAMA SICAKLIGI= 0.571363
 SOGUK PERYOD SONUNDA MATRIS ORTALAMA SICAKLIGI= 0.450115
 HE= 0.607094 REJENERATOR ETKENLIGI= 0.605179

CS=0.95 CRS=5.00 HA=1.0 NTU= 1.50 ITERASYON SAYISI= 20
 SICAK AKISKANIN ORTALAMA CIKIS SICAKLIGI= 0.423401
 SOGUK AKISKANIN ORTALAMA CIKIS SICAKLIGI= 0.606396
 SICAK PERYOD SONUNDA MATRIS ORTALAMA SICAKLIGI= 0.571503
 SOGUK PERYOD SONUNDA MATRIS ORTALAMA SICAKLIGI= 0.450231
 HE= 0.606947 REJENERATOR ETKENLIGI= 0.606396

CS=0.95 CRS=5.00 HA=1.0 NTU= 1.50 ITERASYON SAYISI= 21
 SICAK AKISKANIN ORTALAMA CIKIS SICAKLIGI= 0.423496
 SOGUK AKISKANIN ORTALAMA CIKIS SICAKLIGI= 0.606476
 SICAK PERYOD SONUNDA MATRIS ORTALAMA SICAKLIGI= 0.571600
 SOGUK PERYOD SONUNDA MATRIS ORTALAMA SICAKLIGI= 0.450312
 HE= 0.606645 REJENERATOR ETKENLIGI= 0.606476

CS=0.95 CRS=5.00 HA=1.0 NTU= 1.50 ITERASYON SAYISI= 21
 SICAK AKISKANIN ORTALAMA CIKIS SICAKLIGI= 0.423563
 SOGUK AKISKANIN ORTALAMA CIKIS SICAKLIGI= 0.606532
 SICAK PERYOD SONUNDA MATRIS ORTALAMA SICAKLIGI= 0.571667
 SOGUK PERYOD SONUNDA MATRIS ORTALAMA SICAKLIGI= 0.450367
 HE= 0.606776 REJENERATOR ETKENLIGI= 0.606532

CS=1.00 CRS=1.00 HA=1.0 NTO=10.00 ITERASYON SAYISI= 1
 SICAK AKISKANIN ORTALAMA CIKIS SICAKLIGI= 0.125666
 SOGUK AKISKANIN ORTALAMA CIKIS SICAKLIGI= 0.789682
 SICAK PERYOD SONUNDA MATRIS ORTALAMA SICAKLIGI= 0.874321
 SOGUK PERYOD SONUNDA MATRIS ORTALAMA SICAKLIGI= 0.084632
 HE= 0.874334 REJENERATOR ETKENLIGI= 0.789582

CS=1.00 CRS=1.00 HA=1.0 NTO=10.00 ITERASYON SAYISI= 2
 SICAK AKISKANIN ORTALAMA CIKIS SICAKLIGI= 0.181878
 SOGUK AKISKANIN ORTALAMA CIKIS SICAKLIGI= 0.809408
 SICAK PERYOD SONUNDA MATRIS ORTALAMA SICAKLIGI= 0.902740
 SOGUK PERYOD SONUNDA MATRIS ORTALAMA SICAKLIGI= 0.093324
 HE= 0.818122 REJENERATOR ETKENLIGI= 0.809408

CS=1.00 CRS=1.00 HA=1.0 NTO=10.00 ITERASYON SAYISI= 3
 SICAK AKISKANIN ORTALAMA CIKIS SICAKLIGI= 0.187866
 SOGUK AKISKANIN ORTALAMA CIKIS SICAKLIGI= 0.811274
 SICAK PERYOD SONUNDA MATRIS ORTALAMA SICAKLIGI= 0.905445
 SOGUK PERYOD SONUNDA MATRIS ORTALAMA SICAKLIGI= 0.094163
 HE= 0.812134 REJENERATOR ETKENLIGI= 0.811274

CS=1.00 CRS=1.00 HA=1.0 NTO=10.00 ITERASYON SAYISI= 4
 SICAK AKISKANIN ORTALAMA CIKIS SICAKLIGI= 0.188444
 SOGUK AKISKANIN ORTALAMA CIKIS SICAKLIGI= 0.811453
 SICAK PERYOD SONUNDA MATRIS ORTALAMA SICAKLIGI= 0.905705
 SOGUK PERYOD SONUNDA MATRIS ORTALAMA SICAKLIGI= 0.094244
 HE= 0.811556 REJENERATOR ETKENLIGI= 0.811453

CS=1.00 CRS=1.00 HA=1.0 NTO=10.00 ITERASYON SAYISI= 5
 SICAK AKISKANIN ORTALAMA CIKIS SICAKLIGI= 0.188500
 SOGUK AKISKANIN ORTALAMA CIKIS SICAKLIGI= 0.811470
 SICAK PERYOD SONUNDA MATRIS ORTALAMA SICAKLIGI= 0.905731
 SOGUK PERYOD SONUNDA MATRIS ORTALAMA SICAKLIGI= 0.094252
 HE= 0.811500 REJENERATOR ETKENLIGI= 0.811470

CS=1.00 CRS=1.00 HA=1.0 NTO=10.00 ITERASYON SAYISI= 5
 SICAK AKISKANIN ORTALAMA CIKIS SICAKLIGI= 0.188506
 SOGUK AKISKANIN ORTALAMA CIKIS SICAKLIGI= 0.811473
 SICAK PERYOD SONUNDA MATRIS ORTALAMA SICAKLIGI= 0.905733
 SOGUK PERYOD SONUNDA MATRIS ORTALAMA SICAKLIGI= 0.094253
 HE= 0.811494 REJENERATOR ETKENLIGI= 0.811473

CS=1.00 CRS=5.00 HA=1.0 NTO=10.00 ITERASYON SAYISI= 1
 SICAK AKISKANIN ORTALAMA CIKIS SICAKLIGI= 0.000056
 SGGUK AKISKANIN ORTALAMA CIKIS SICAKLIGI= 0.614267
 SICAK PERYOD SONUNDA MATRIS ORTALAMA SICAKLIGI= 0.199988
 SGGUK PERYOD SONUNDA MATRIS ORTALAMA SICAKLIGI= 0.077134
 HE= 0.999944 REJENERATOR ETKENLIGI= 0.614267

CS=1.00 CRS=5.00 HA=1.0 NTO=10.00 ITERASYON SAYISI= 2
 SICAK AKISKANIN ORTALAMA CIKIS SICAKLIGI= 0.001119
 SGGUK AKISKANIN ORTALAMA CIKIS SICAKLIGI= 0.722434
 SICAK PERYOD SONUNDA MATRIS ORTALAMA SICAKLIGI= 0.276908
 SGGUK PERYOD SONUNDA MATRIS ORTALAMA SICAKLIGI= 0.132423
 HE= 0.993831 REJENERATOR ETKENLIGI= 0.722434

CS=1.00 CRS=5.00 HA=1.0 NTO=10.00 ITERASYON SAYISI= 3
 SICAK AKISKANIN ORTALAMA CIKIS SICAKLIGI= 0.005048
 SGGUK AKISKANIN ORTALAMA CIKIS SICAKLIGI= 0.772115
 SICAK PERYOD SONUNDA MATRIS ORTALAMA SICAKLIGI= 0.331411
 SGGUK PERYOD SONUNDA MATRIS ORTALAMA SICAKLIGI= 0.176990
 HE= 0.994952 REJENERATOR ETKENLIGI= 0.772115

CS=1.00 CRS=5.00 HA=1.0 NTO=10.00 ITERASYON SAYISI= 4
 SICAK AKISKANIN ORTALAMA CIKIS SICAKLIGI= 0.012131
 SGGUK AKISKANIN ORTALAMA CIKIS SICAKLIGI= 0.802103
 SICAK PERYOD SONUNDA MATRIS ORTALAMA SICAKLIGI= 0.374561
 SGGUK PERYOD SONUNDA MATRIS ORTALAMA SICAKLIGI= 0.214143
 HE= 0.987869 REJENERATOR ETKENLIGI= 0.802103

CS=1.00 CRS=5.00 HA=1.0 NTO=10.00 ITERASYON SAYISI= 5
 SICAK AKISKANIN ORTALAMA CIKIS SICAKLIGI= 0.021116
 SGGUK AKISKANIN ORTALAMA CIKIS SICAKLIGI= 0.822679
 SICAK PERYOD SONUNDA MATRIS ORTALAMA SICAKLIGI= 0.409918
 SGGUK PERYOD SONUNDA MATRIS ORTALAMA SICAKLIGI= 0.245385
 HE= 0.978882 REJENERATOR ETKENLIGI= 0.822679

CS=1.00 CRS=5.00 HA=1.0 NTO=10.00 ITERASYON SAYISI= 6
 SICAK AKISKANIN ORTALAMA CIKIS SICAKLIGI= 0.030625
 SGGUK AKISKANIN ORTALAMA CIKIS SICAKLIGI= 0.837875
 SICAK PERYOD SONUNDA MATRIS ORTALAMA SICAKLIGI= 0.439257
 SGGUK PERYOD SONUNDA MATRIS ORTALAMA SICAKLIGI= 0.271685
 HE= 0.969375 REJENERATOR ETKENLIGI= 0.837875

CS=1.00 CRS=5.00 HA=1.0 NTO=10.00 ITERASYON SAYISI= 7
 SICAK AKISKANIN ORTALAMA CIKIS SICAKLIGI= 0.039744
 SGGUK AKISKANIN ORTALAMA CIKIS SICAKLIGI= 0.849627
 SICAK PERYOD SONUNDA MATRIS ORTALAMA SICAKLIGI= 0.463734
 SGGUK PERYOD SONUNDA MATRIS ORTALAMA SICAKLIGI= 0.293811
 HE= 0.960256 REJENERATOR ETKENLIGI= 0.849627

CS=1.00 CRS=5.00 HA=1.0 NTO=10.00 ITERASYON SAYISI= 8
 SICAK AKISKANIN ORTALAMA CIKIS SICAKLIGI= 0.048023
 SGGUK AKISKANIN ORTALAMA CIKIS SICAKLIGI= 0.858985
 SICAK PERYOD SONUNDA MATRIS ORTALAMA SICAKLIGI= 0.484205
 SGGUK PERYOD SONUNDA MATRIS ORTALAMA SICAKLIGI= 0.312411
 HE= 0.951977 REJENERATOR ETKENLIGI= 0.858985

CS=1.00 CRS=5.00 HA=1.0 NTJ=10.00 ITERASYON SAYISI= 9
 SICAK AKISKANIN ORTALAMA CIKIS SICAKLIGI= 0.055306
 SOGUK AKISKANIN ORTALAMA CIKIS SICAKLIGI= 0.866580
 SICAK PERYOD SONUNDA MATRIS ORTALAMA SICAKLIGI= 0.501348
 SOGUK PERYOD SONUNDA MATRIS ORTALAMA SICAKLIGI= 0.328036
 HE= 0.944694 REJENERATOR ETKENLIGI= 0.866580

CS=1.00 CRS=5.00 HA=1.0 NTJ=10.00 ITERASYON SAYISI= 10
 SICAK AKISKANIN ORTALAMA CIKIS SICAKLIGI= 0.061593
 SOGUK AKISKANIN ORTALAMA CIKIS SICAKLIGI= 0.872822
 SICAK PERYOD SONUNDA MATRIS ORTALAMA SICAKLIGI= 0.515717
 SOGUK PERYOD SONUNDA MATRIS ORTALAMA SICAKLIGI= 0.341155
 HE= 0.928407 REJENERATOR ETKENLIGI= 0.872822

CS=1.00 CRS=5.00 HA=1.0 NTJ=10.00 ITERASYON SAYISI= 11
 SICAK AKISKANIN ORTALAMA CIKIS SICAKLIGI= 0.066962
 SOGUK AKISKANIN ORTALAMA CIKIS SICAKLIGI= 0.877990
 SICAK PERYOD SONUNDA MATRIS ORTALAMA SICAKLIGI= 0.527761
 SOGUK PERYOD SONUNDA MATRIS ORTALAMA SICAKLIGI= 0.352167
 HE= 0.933038 REJENERATOR ETKENLIGI= 0.877990

CS=1.00 CRS=5.00 HA=1.0 NTJ=10.00 ITERASYON SAYISI= 12
 SICAK AKISKANIN ORTALAMA CIKIS SICAKLIGI= 0.071514
 SOGUK AKISKANIN ORTALAMA CIKIS SICAKLIGI= 0.882291
 SICAK PERYOD SONUNDA MATRIS ORTALAMA SICAKLIGI= 0.537864
 SOGUK PERYOD SONUNDA MATRIS ORTALAMA SICAKLIGI= 0.361408
 HE= 0.928436 REJENERATOR ETKENLIGI= 0.882291

CS=1.00 CRS=5.00 HA=1.0 NTJ=10.00 ITERASYON SAYISI= 13
 SICAK AKISKANIN ORTALAMA CIKIS SICAKLIGI= 0.075359
 SOGUK AKISKANIN ORTALAMA CIKIS SICAKLIGI= 0.885881
 SICAK PERYOD SONUNDA MATRIS ORTALAMA SICAKLIGI= 0.546336
 SOGUK PERYOD SONUNDA MATRIS ORTALAMA SICAKLIGI= 0.369163
 HE= 0.924641 REJENERATOR ETKENLIGI= 0.885881

CS=1.00 CRS=5.00 HA=1.0 NTJ=10.00 ITERASYON SAYISI= 14
 SICAK AKISKANIN ORTALAMA CIKIS SICAKLIGI= 0.078598
 SOGUK AKISKANIN ORTALAMA CIKIS SICAKLIGI= 0.888863
 SICAK PERYOD SONUNDA MATRIS ORTALAMA SICAKLIGI= 0.553443
 SOGUK PERYOD SONUNDA MATRIS ORTALAMA SICAKLIGI= 0.375670
 HE= 0.921402 REJENERATOR ETKENLIGI= 0.888863

CS=1.00 CRS=5.00 HA=1.0 NTJ=10.00 ITERASYON SAYISI= 15
 SICAK AKISKANIN ORTALAMA CIKIS SICAKLIGI= 0.081322
 SOGUK AKISKANIN ORTALAMA CIKIS SICAKLIGI= 0.891397
 SICAK PERYOD SONUNDA MATRIS ORTALAMA SICAKLIGI= 0.559406
 SOGUK PERYOD SONUNDA MATRIS ORTALAMA SICAKLIGI= 0.381130
 HE= 0.913678 REJENERATOR ETKENLIGI= 0.891397

CS=1.00 CRS=5.00 HA=1.0 NTJ=10.00 ITERASYON SAYISI= 16
 SICAK AKISKANIN ORTALAMA CIKIS SICAKLIGI= 0.083611
 SOGUK AKISKANIN ORTALAMA CIKIS SICAKLIGI= 0.893503
 SICAK PERYOD SONUNDA MATRIS ORTALAMA SICAKLIGI= 0.564407
 SOGUK PERYOD SONUNDA MATRIS ORTALAMA SICAKLIGI= 0.385710
 HE= 0.916389 REJENERATOR ETKENLIGI= 0.893503

CS=1.00 CRS=5.00 HA=1.0 NTO=10.00 ITERASYON SAYISI= 17
 SICAK AKISKANIN ORTALAMA CIKIS SICAKLIGI= 0.385533
 SOGJK AKISKANIN ORTALAMA CIKIS SICAKLIGI= 0.895269
 SICAK PERYOD SONUNDA MATRIS ORTALAMA SICAKLIGI= 0.568604
 SOGJK PERYOD SONUNDA MATRIS ORTALAMA SICAKLIGI= 0.389553
 HE= 0.914467 REJENERATOR ETKENLIGI= 0.895269

CS=1.00 CRS=5.00 HA=1.0 NTO=10.00 ITERASYON SAYISI= 18
 SICAK AKISKANIN ORTALAMA CIKIS SICAKLIGI= 0.087147
 SOGJK AKISKANIN ORTALAMA CIKIS SICAKLIGI= 0.896750
 SICAK PERYOD SONUNDA MATRIS ORTALAMA SICAKLIGI= 0.572124
 SOGJK PERYOD SONUNDA MATRIS ORTALAMA SICAKLIGI= 0.392778
 HE= 0.912853 REJENERATOR ETKENLIGI= 0.896750

CS=1.00 CRS=5.00 HA=1.0 NTO=10.00 ITERASYON SAYISI= 19
 SICAK AKISKANIN ORTALAMA CIKIS SICAKLIGI= 0.088501
 SOGJK AKISKANIN ORTALAMA CIKIS SICAKLIGI= 0.897992
 SICAK PERYOD SONUNDA MATRIS ORTALAMA SICAKLIGI= 0.575078
 SOGJK PERYOD SONUNDA MATRIS ORTALAMA SICAKLIGI= 0.395483
 HE= 0.911799 REJENERATOR ETKENLIGI= 0.897992

CS=1.00 CRS=5.00 HA=1.0 NTO=10.00 ITERASYON SAYISI= 20
 SICAK AKISKANIN ORTALAMA CIKIS SICAKLIGI= 0.089638
 SOGJK AKISKANIN ORTALAMA CIKIS SICAKLIGI= 0.899034
 SICAK PERYOD SONUNDA MATRIS ORTALAMA SICAKLIGI= 0.577555
 SOGJK PERYOD SONUNDA MATRIS ORTALAMA SICAKLIGI= 0.397752
 HE= 0.910362 REJENERATOR ETKENLIGI= 0.899034

CS=1.00 CRS=5.00 HA=1.0 NTO=10.00 ITERASYON SAYISI= 21
 SICAK AKISKANIN ORTALAMA CIKIS SICAKLIGI= 0.090591
 SOGJK AKISKANIN ORTALAMA CIKIS SICAKLIGI= 0.899908
 SICAK PERYOD SONUNDA MATRIS ORTALAMA SICAKLIGI= 0.579634
 SOGJK PERYOD SONUNDA MATRIS ORTALAMA SICAKLIGI= 0.399656
 HE= 0.909409 REJENERATOR ETKENLIGI= 0.899908

CS=1.00 CRS=5.00 HA=1.0 NTO=10.00 ITERASYON SAYISI= 22
 SICAK AKISKANIN ORTALAMA CIKIS SICAKLIGI= 0.091392
 SOGJK AKISKANIN ORTALAMA CIKIS SICAKLIGI= 0.900640
 SICAK PERYOD SONUNDA MATRIS ORTALAMA SICAKLIGI= 0.581378
 SOGJK PERYOD SONUNDA MATRIS ORTALAMA SICAKLIGI= 0.401254
 HE= 0.903608 REJENERATOR ETKENLIGI= 0.900640

CS=1.00 CRS=5.00 HA=1.0 NTO=10.00 ITERASYON SAYISI= 23
 SICAK AKISKANIN ORTALAMA CIKIS SICAKLIGI= 0.092063
 SOGJK AKISKANIN ORTALAMA CIKIS SICAKLIGI= 0.901256
 SICAK PERYOD SONUNDA MATRIS ORTALAMA SICAKLIGI= 0.582841
 SOGJK PERYOD SONUNDA MATRIS ORTALAMA SICAKLIGI= 0.402594
 HE= 0.907927 REJENERATOR ETKENLIGI= 0.901256

CS=1.00 CRS=5.00 HA=1.0 NTO=10.00 ITERASYON SAYISI= 24
 SICAK AKISKANIN ORTALAMA CIKIS SICAKLIGI= 0.092626
 SOGJK AKISKANIN ORTALAMA CIKIS SICAKLIGI= 0.901772
 SICAK PERYOD SONUNDA MATRIS ORTALAMA SICAKLIGI= 0.584068
 SOGJK PERYOD SONUNDA MATRIS ORTALAMA SICAKLIGI= 0.403718
 HE= 0.907374 REJENERATOR ETKENLIGI= 0.901772

CS=1.00 CRS=5.00 HA=1.0 NTO=10.00 ITERASYON SAYISI= 25
 SICAK AKISKANIN ORTALAMA CIKIS SICAKLIGI= 0.093099
 SDGJK AKISKANIN ORTALAMA CIKIS SICAKLIGI= 0.902205
 SICAK PERYOD SONUNDA MATRIS ORTALAMA SICAKLIGI= 0.585098
 SDGUK PERYOD SONUNDA MATRIS ORTALAMA SICAKLIGI= 0.404662
 HE= 0.906901 REJENERATOR ETKENLIGI= 0.902205

CS=1.00 CRS=5.00 HA=1.0 NTO=10.00 ITERASYON SAYISI= 26
 SICAK AKISKANIN ORTALAMA CIKIS SICAKLIGI= 0.093495
 SDGJK AKISKANIN ORTALAMA CIKIS SICAKLIGI= 0.902567
 SICAK PERYOD SONUNDA MATRIS ORTALAMA SICAKLIGI= 0.585963
 SDGUK PERYOD SONUNDA MATRIS ORTALAMA SICAKLIGI= 0.405453
 HE= 0.906505 REJENERATOR ETKENLIGI= 0.902567

CS=1.00 CRS=5.00 HA=1.0 NTO=10.00 ITERASYON SAYISI= 27
 SICAK AKISKANIN ORTALAMA CIKIS SICAKLIGI= 0.093828
 SDGJK AKISKANIN ORTALAMA CIKIS SICAKLIGI= 0.902872
 SICAK PERYOD SONUNDA MATRIS ORTALAMA SICAKLIGI= 0.586688
 SDGUK PERYOD SONUNDA MATRIS ORTALAMA SICAKLIGI= 0.406117
 HE= 0.906172 REJENERATOR ETKENLIGI= 0.902872

CS=1.00 CRS=5.00 HA=1.0 NTO=10.00 ITERASYON SAYISI= 28
 SICAK AKISKANIN ORTALAMA CIKIS SICAKLIGI= 0.094107
 SDGJK AKISKANIN ORTALAMA CIKIS SICAKLIGI= 0.903128
 SICAK PERYOD SONUNDA MATRIS ORTALAMA SICAKLIGI= 0.587296
 SDGUK PERYOD SONUNDA MATRIS ORTALAMA SICAKLIGI= 0.406674
 HE= 0.905893 REJENERATOR ETKENLIGI= 0.903128

CS=1.00 CRS=5.00 HA=1.0 NTO=10.00 ITERASYON SAYISI= 29
 SICAK AKISKANIN ORTALAMA CIKIS SICAKLIGI= 0.094341
 SDGJK AKISKANIN ORTALAMA CIKIS SICAKLIGI= 0.903342
 SICAK PERYOD SONUNDA MATRIS ORTALAMA SICAKLIGI= 0.587806
 SDGUK PERYOD SONUNDA MATRIS ORTALAMA SICAKLIGI= 0.407141
 HE= 0.905659 REJENERATOR ETKENLIGI= 0.903342

CS=1.00 CRS=5.00 HA=1.0 NTO=10.00 ITERASYON SAYISI= 30
 SICAK AKISKANIN ORTALAMA CIKIS SICAKLIGI= 0.094537
 SDGJK AKISKANIN ORTALAMA CIKIS SICAKLIGI= 0.903522
 SICAK PERYOD SONUNDA MATRIS ORTALAMA SICAKLIGI= 0.588234
 SDGUK PERYOD SONUNDA MATRIS ORTALAMA SICAKLIGI= 0.407533
 HE= 0.905463 REJENERATOR ETKENLIGI= 0.903522

CS=1.00 CRS=5.00 HA=1.0 NTO=10.00 ITERASYON SAYISI= 31
 SICAK AKISKANIN ORTALAMA CIKIS SICAKLIGI= 0.094702
 SDGJK AKISKANIN ORTALAMA CIKIS SICAKLIGI= 0.903674
 SICAK PERYOD SONUNDA MATRIS ORTALAMA SICAKLIGI= 0.588593
 SDGUK PERYOD SONUNDA MATRIS ORTALAMA SICAKLIGI= 0.407862
 HE= 0.905298 REJENERATOR ETKENLIGI= 0.903674

CS=1.00 CRS=5.00 HA=1.0 NTO=10.00 ITERASYON SAYISI= 32
 SICAK AKISKANIN ORTALAMA CIKIS SICAKLIGI= 0.094841
 SDGJK AKISKANIN ORTALAMA CIKIS SICAKLIGI= 0.903800
 SICAK PERYOD SONUNDA MATRIS ORTALAMA SICAKLIGI= 0.588895
 SDGUK PERYOD SONUNDA MATRIS ORTALAMA SICAKLIGI= 0.408138
 HE= 0.905159 REJENERATOR ETKENLIGI= 0.903800

CS=1.00 CRS=5.00 HA=1.0 NTO=10.00 ITERASYON SAYISI= 33
 SICAK AKISKANIN ORTALAMA ÇIKIŞ SICAKLIĞI= 0.094957
 SOĞUK AKISKANIN ORTALAMA ÇIKIŞ SICAKLIĞI= 0.903906
 SICAK PERİYOD SONUNDA MATRİS ORTALAMA SICAKLIĞI= 0.589148
 SOĞUK PERİYOD SONUNDA MATRİS ORTALAMA SICAKLIĞI= 0.408370
 HE= 0.905043 REJENERATOR ETKENLİĞİ= 0.903906

CS=1.00 CRS=5.00 HA=1.0 NTO=10.00 ITERASYON SAYISI= 34
 SICAK AKISKANIN ORTALAMA ÇIKIŞ SICAKLIĞI= 0.095054
 SOĞUK AKISKANIN ORTALAMA ÇIKIŞ SICAKLIĞI= 0.903996
 SICAK PERİYOD SONUNDA MATRİS ORTALAMA SICAKLIĞI= 0.589359
 SOĞUK PERİYOD SONUNDA MATRİS ORTALAMA SICAKLIĞI= 0.408564
 HE= 0.904946 REJENERATOR ETKENLİĞİ= 0.903996

CS=1.00 CRS=5.00 HA=1.0 NTO=10.00 ITERASYON SAYISI= 34
 SICAK AKISKANIN ORTALAMA ÇIKIŞ SICAKLIĞI= 0.095136
 SOĞUK AKISKANIN ORTALAMA ÇIKIŞ SICAKLIĞI= 0.904070
 SICAK PERİYOD SONUNDA MATRİS ORTALAMA SICAKLIĞI= 0.589539
 SOĞUK PERİYOD SONUNDA MATRİS ORTALAMA SICAKLIĞI= 0.408728
 HE= 0.904864 REJENERATOR ETKENLİĞİ= 0.904070