

# Kümen Üretim Tesisi Isı Değiştiricisi Devresinin Statik Simülasyonu

\*<sup>1</sup>Erhan Kayabaşı, <sup>2</sup>Mustafa Kolukısa, <sup>3</sup>Hüseyin Kurt  
Karabük Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Karabük 78050, Türkiye.

## Özet

Bir ısı değiştiricisi, iki veya daha fazla sıvı arasındaki, katı veya sıvı arasındaki veya katı parçacıklar ve akışkan arasındaki termal iç enerjisini dışarıdan ısı ve iş girişi olmaksızın gerçekleştiren cihazlardır. Isı değiştiricileri kullanım amaçlarına göre değişik konstrüksiyonlarda, kapasitelerde, boyutlarda ve tiplerde olabilmektedirler. Isı geri kazanım amaçlı kullanılan ısı değiştiricileri sanayi kuruluşlarında yatırım maliyetinde önemli bir yer tutmaktadır. Bu nedenle ısı değiştiricisi seçilirken veya ısı değiştiricisi devreleri tasarlanırken oldukça dikkat edilmeli ve ısı geri kazanımının maksimum olması için doğru ısı değiştiricisi veya efektif bir ısı değiştiricisi devresi tasarlanması gerekmektedir. Bu çalışmada, bir kümen üretim tesisinde bulunan ısı değiştiricisi devresinin statik simülasyonu yapılmıştır. Devreye giriş yapan ve devreden çıkış yapan sıcak ve soğuk akışların koordinatları matris denklemleriyle tanımlanarak devre içerisindeki sıcaklık dağılımları ve devre çıkışındaki sıcaklıklar iterasyona başvurulmadan, özel yazılım ve donanımlara başvurmaksızın yüksek bir doğrulukta elde edilmiştir. Simülasyon sonucunda ısı değiştiricisi devresindeki her bir hücreden geçen sıcak akış ve soğuk akışa ait sıcaklıklar işletme şartları ile örtüşecek şekilde tam doğrulukta elde edilmiştir. Ayrıca devre içerisindeki ısı değiştiricilerindeki sıcaklık dağılımları elde edilerek devrenin statik durumunun izlenmesi sağlanmıştır.

**Anahtar kelimeler:** Statik Simülasyon, ısı değiştiriciler, ısı değiştirici devreleri, kümen üretimi

## Abstract

A Heat Exchanger is device which realises thermal internal energy between two or more liquid, solid or liquid or solid particles and fluids without heat and occupation input outside. According to usage purposes heat exchangers may be in various constructions, capacity, size and types. Heat exchangers used for intentional heat recovery have an important situation of investment cost in industrial organizations. Therefore it should be considered quite while heat exchanger selected or heat exchanger circuits designed and it is required to designing correct heat exchanger or an effective heat exchanger network. In this study, it is made of static simulation that heat exchanger network which is found in a cumene production plant. By coordinates of hot and cold flows which enters to circuit and goes output from circuit are defined with matrix equations that temperature distributions in network and temperatures output network are obtained in high accuracy without to recourse iteration, specific software and hardware. In consequence of simulation the temperatures belonging to hot and cold flow passed from each cell in the heat exchanger network are obtained to coincide with the operating conditions in intrinsic accuracy. In addition thereby the temperature distribution within the circuit of the heat exchanger are obtained, following static state of circuit is provided.

**Key words:** Static simulation, heat exchangers, heat exchanger networks, cumene production.

## 1. Giriş

Enerji dünya çapındaki değişik amaçlarla kurulmuş tesislerde kullanılan temel bir ihtiyaçtır. Günümüzde bütün ülkeler enerji ithalatı, çevre kirliliği, küresel ısınma, enerji kullanımındaki verimsizlik ve enerji maliyetlerinin artması gibi sorunlardan kaynaklanan problemleri çözmek için büyük bir gayret içerisinde.

Yüksek sıcaklıktaki bir akışkandan düşük sıcaklıktaki bir başka akışkana ısı transferi yoluyla ısı geri kazanımı sağlayan ısı değiştiricileri ve ısı değiştiricisi devreleri birçok proses teknolojisi ve enerji ekonomisi alanında kullanılmaktadır. Isı geri kazanımı için kullanılan ısı değiştiricileri sanayi kuruluşlarında yatırım maliyetinde önemli bir yer tutmaktadır. Bu nedenle de ısı değiştiricisi seçilirken ya da ısı değiştiricisi devreleri tasarlanırken oldukça dikkat edilmeli ve ısı geri kazanımının maksimum olması için doğru ısı değiştiricisi veya efektif bir ısı değiştiricisi devresi tasarlanması gerekmektedir [1].

Gvozdenac vd.[2], yaptığı çalışmada ısı değiştiricilerinde sabit akış hızında iletimle yoluyla akışkanlar ve ısı değiştiricisi duvarı arasında gerçekleşen ısı geçişi fonksiyonlarını çözmüştür. Varbanov vd.[3], yaptıkları çalışmada hücre sayısının doğrudan belirlenebilmesi için daha çok plaka tipi ısı değiştiricilerinde uygulanabilen bir model geliştirmişlerdir. Wolf vd.[4], yaptıkları çalışmada tek geçişli ısı değiştiricileri için çeşitli dinamik modeller sunmuşlardır. Boriboonsri vd.[5], yaptıkları çalışmada bir elektro kaplama banyosuna batırılmış ve bir soğutma sistemi ile donatılmış bir ısı değiştiricisine bağlı sert krom elektro kaplama banyosundan oluşan proses ağlarının dinamik davranışını incelemişlerdir. Schaal [6], yaptıkları çalışmada kirletici etkisi altındaki bir ısı değiştiricisinin çalışma süresini optimize etmişlerdir. Rennie [7], yaptıkları çalışmada çift borulu spiral bir ısı değiştiricisinin paralel ve ters akışta ısı transfer karakteristiklerini nümerik olarak belirlemek için bir hesaplamalı akışkanlar dinamiği paket programı kullanmışlardır. Evangelista [8], yaptığı çalışmada çift borulu ısı değiştiricisi dinamik simülasyonu için yeni bir metot geliştirmiş ve sonuçlarının doğruluğunu ispatlamıştır. Triratana vd. [9], yaptıkları çalışmada hızlı kirlenme etkileri altındaki plakalı ısı değiştiricilerinde matematiksel model ve dinamik simülasyon hazırlamışlardır. Triratana vd. [10], yaptıkları çalışmada ters ve paralel akışlı çok geçişli ısı değiştiricilerinin ve ısı değiştiricisi ağlarının bir boyutlu akışta dinamik davranışını modellemişler ve simüle etmişlerdir. Strelow [11], çalışmasında ısı değiştiricileri ve ısı değiştiricisi devrelerini matris formunda tanımlayarak, iterasyona başvurmaksızın zamandan bağımsız olarak sistem sıcaklık çıkışlarını izlemek amacıyla genel bir hesaplama yöntemi geliştirmiş ve statik simülasyon hazırlamıştır. Navarro vd. [12], çapraz akışlı bir ısı değiştiricisinin etkenliğinin hesaplanması için matematiksel bir model geliştirmişlerdir.

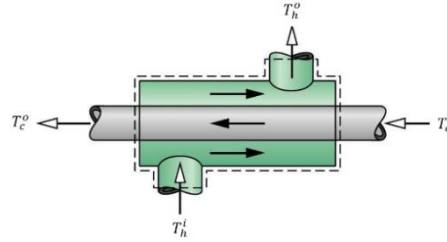
Bu çalışmada, bir kümen üretim tesisinde bulunan ısı değiştiricisi devresinin statik simülasyonu yapılmıştır. Devreye giriş yapan ve devreden çıkış yapan sıcak ve soğuk akışların koordinatları matris denklemleriyle tanımlanarak devre içerisindeki sıcaklık dağılımları ve devre çıkışındaki sıcaklıklar iterasyona başvurulmadan, özel yazılım ve donanımlara başvurmaksızın yüksek bir doğrulukta elde edilmiştir.

## 2. Isı Değiştiricilerinde Statik Simülasyon

Devreye giriş yapan ve devreden çıkış yapan sıcak ve soğuk akışların koordinatları matris denklemleriyle tanımlanarak devre içerisindeki sıcaklık dağılımları ve devre çıkışındaki sıcaklıklar iterasyona başvurulmadan, yüksek bir doğrulukta elde edilebilmektedir. Ayrıca ısı değiştiricilerinde uygulanan statik simülasyon yardımıyla günümüzde simülasyon hazırlanması için gerekli olan, uzun ve zahmetli üç boyutlu tasarım ve analiz yazılımlarına başvurmadan, yüksek kapasite ve donanıma sahip bilgisayarlar kullanmadan kısa sürede ve kolay bir şekilde karmaşık yapıdaki ısı değiştiricilerinin ve ısı değiştiricisi devrelerinin çıkış sıcaklıkları ve sıcaklık dağılımları elde edilebilmektedir.

## 2.1. Bir tek ısı değiştiricisi için hesaplama

Etkenliği  $\varepsilon$  olan bir ısı değiştiricisinde en az birer adet sıcak ve soğuk akım bulunmaktadır. Etkenlik, toplam ısı transfer katsayısı  $U$ , ısı transfer yüzey alanı  $A$  ve akışların ısı kapasiteleri  $C_h$ ,  $C_c$ 'nin bir fonksiyonudur. Isı değiştiricisi içindeki bütün akışlar giriş sıcaklığı ve ısı kapasitesi ile kolayca karakterize edilebilmektedir [13]. Isı değiştiricisinde giren ve çıkan akımlar Şekil 1'de görölmektedir.



Şekil 1. Isı değiştiricisine giren sıcak ve soğuk akımlar

$$\varepsilon_h = f(U, A, \dot{C}_h, \dot{C}_c) \quad (1)$$

$$\varepsilon_c = f(U, A, \dot{C}_h, \dot{C}_c) \quad (2)$$

Eşitlik 1 ve 2'de verilen etkenlik değerleri  $\varepsilon_h$  ve  $\varepsilon_c$ 'nin çalışma karakteristikleri birbirine doğrusal olarak bağlıdır. Bir ısı değiştiricisine giren ve çıkan sıcak ve soğuk akımın etkenlikle olan ilişkisi aşağıdaki eşitliklerde verilmiştir [12].

$$T_h^o = T_h^i - \varepsilon_h (T_h^i - T_c^i) \quad (3)$$

$$T_c^o = T_c^i - \varepsilon_c (T_h^i - T_c^i) \quad (4)$$

$$T_h^o = (1 - \varepsilon_h) T_h^i + \varepsilon_h T_c^i \quad (5)$$

$$T_c^o = \varepsilon_c T_h^i + (1 - \varepsilon_c) T_c^i \quad (6)$$

Yukarıdaki lineer denklemler, matris formuna donüştüröldüğünde ısı değiştiricisinin çıkış sıcaklıklarını veren Eşitlik 7 ve 8 elde edilir.

$$\begin{bmatrix} T_h^o \\ T_c^o \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 - \varepsilon_h & \varepsilon_h \\ \varepsilon_c & 1 - \varepsilon_c \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} T_h^i \\ T_c^i \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$T^o = \varepsilon^A \cdot T^i \quad (8)$$

Buradaki  $\varepsilon^A$  matrisi, içerdiği parametrelerden dolayı ısı değiştiricisi karakteristiği olarak ifade edilmektedir. Bu matris, ısı transfer alanı içerisindeki proses akımı doğrultusundaki  $T^i$  vektöründen  $T^o$  vektörüne geçiş yaparak çıkış sıcaklıklarının elde edilmesini sağlamaktadır [11].

## 3.2. Bir Isı Değiştiricisi Devresi İçin Hesaplama

Isı değiştirici devresinin teknik özelliklerinin matematiksel olarak modellenmesi için bir adet fonksiyon matris modeli tanımlanmıştır. Fonksiyon matris modeli, giriş ve çıkış sıcaklıkları arasındaki ilişkiyi doğrusal olarak ifade etmektedir.

$$\begin{bmatrix} T_h^o \\ T_c^o \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E - \varepsilon_h & \varepsilon_h \\ \varepsilon_c & E - \varepsilon_c \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} T_h^i \\ T_c^i \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$T^o = \varepsilon \cdot T^i \quad (10)$$

Eşitlik 10'daki  $\varepsilon$  fonksiyon matrisi m adet ısı değiştiricisinden oluşan bir ısı değiştirici devresi için  $m \times m$  boyutunda 4 adet alt matristen oluşmaktadır.  $\varepsilon_c$  ve  $\varepsilon_h$  alt matrisleri diyagonal matrislerdir [11]. Isı değiştiricisinin hücelere bölünerek bir ısı değiştirici devresine dönüştürülmesi Şekil 2'de görülmektedir.

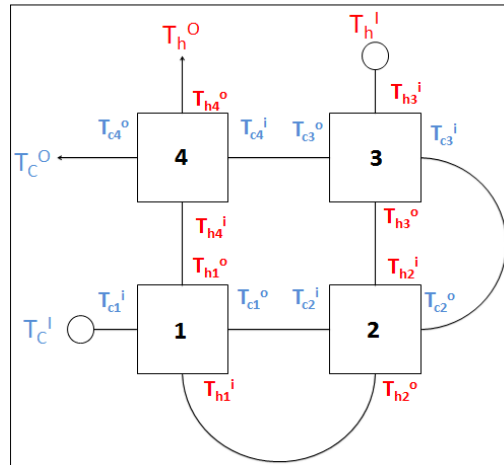
Isı değiştirici devresinin çıkış sıcaklıklarını veren  $T^o$  vektörünün, giriş sıcaklığı olan  $T^i$  vektörünün bir fonksiyonu olarak doğru bir şekilde tanımlanması çözümün bulunması için yeterli değildir. Çünkü  $T^i$  vektöründe hala bilinmeyen sıcaklıklar bulunmaktadır. Bilinmeyen sıcaklıkların elde edilmesi için ikinci bir modelin belirlenmesi gerekmektedir. Bu model ısı değiştiricisine giren akımların giriş noktalarını belirlememize yarayan Input modeldir [11].

Input model, proses akışının ısı değiştiricisinin hangi geçişinden girmekte olduğu bilgisini içerir[13].

I matrisi devre içerisinde oluşan proses akımlarının devreye giriş noktalarını göstermekte olup, iki tane 0 matristen,  $I_h$  ve  $I_c$  matrislerinden oluşmaktadır. Yapı içindeki elemanlar ve anlamları aşağıda verilmiştir [11].

$I_h(i,j)=1$ ; Isı değiştirici devresinde j giriş noktasından i hüceline giren sıcak akım.

$I_c(i,j)=1$ ; Isı değiştirici devresinde j giriş noktasından i hüceline giren soğuk akım.



Şekil 2. Isı değiştiricisinin ısı değiştirici devresi haline getirilmesi

$$\begin{bmatrix} T_h^i \\ T_c^i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{hh} & S_{hc} \\ S_{ch} & S_{cc} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} T_h^o \\ T_c^o \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} I_h & 0 \\ 0 & I_c \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} T_h^i \\ T_c^i \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$T^i = S \cdot T^o + I \cdot T^i \quad (12)$$

Eşitlik 11 ve 12’de kullanılan S yapı matrisi ısı değiştiricisi veya ısı değiştiricisi devresindeki iç bağlantıları tanımlamaktadır. Bu matris, dört adet  $m \times m$  formatında alt matristen meydana gelmektedir. Matris elemanları 0 ile 1 değerlerinden birini almaktadır. Yapı içindeki elemanlar ve anlamları aşağıda verilmiştir.

$S_{hh}(i,j)=x$ ; j hücrelerinden sıcak bir şekilde çıkan ve i hücrelerine x oranında gelen sıcak akış.

$S_{ch}(i,j)=x$ ; j hücrelerinden soğuk bir şekilde çıkan ve i hücrelerine x oranında gelen sıcak akış.

$S_{hc}(i,j)=x$ ; j hücrelerinden sıcak bir şekilde çıkan ve i hücrelerine x oranında gelen soğuk akış.

$S_{cc}(i,j)=x$ ; j hücrelerinden soğuk bir şekilde çıkan ve i hücrelerine x oranında gelen soğuk akış.

Eşitlik 6 ile birlikte  $T^i$  ve  $T^o$  arasında bir diğer matematiksel bağıntı daha gerekmektedir. Eşitlik 9 ve 11 iki adet bilinmeyen vektör ile genel bir matris denklemleri sistemini temsil etmektedir. Eşitlik 11, Eşitlik 9’da yerine yazılıp çözüldüğünde hücrenin çıkış sıcaklık vektörü  $T^o$  elde edilir.

$$T^o = (E - \varepsilon \cdot S)^{-1} \cdot \varepsilon \cdot I \cdot T^i \quad (13)$$

Eşitlik 13’de tanımlanan ısı değiştiricisi sistemine giren akımların tanımlanmasında yararlanılan Input Model’e benzer şekilde, akışların ısı değiştiricisini terk ettiği noktaları da tanımlayan bir diğer modelin tanımlanması gerekmektedir [13]. Bu model Output Model’dir ve Eşitlik 14’teki gibi ifade edilmektedir.

$$\begin{bmatrix} T_h^o \\ T_c^o \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} O_h & 0 \\ 0 & O_c \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} T_h^i \\ T_c^i \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$T^o = O \cdot T^i \quad (15)$$

Output matris (O), ısı değiştiricisini terk eden geçişleri göstermektedir. Matriste her bir proses akışı için bir adet satır bulunur, sütunlar ise geçişleri gösterir. (i,j) pozisyonuna yazılan x değeri ( $0 < x < 1$ ) j geçişinden i akışına giren akışın oranını vermektedir [11].

Output matris iki adet sıfır matrise ek olarak  $O_h$  ve  $O_c$  alt matrislerinden meydana gelmektedir. Output matrisin elemanları 0 ve 1 değerleri arasında bir değer almaktadır ve output matriste yer alan  $O_h$  ve  $O_c$  aşağıdaki şekilde tanımlanmaktadır [11].

$O_h(i,j)=I$ ; Isı değiştiricisini j hücrelerinden i hücrelerine x oranında gelerek terk eden sıcak akım.

$O_c(i,j)=I$ ; Isı değiştiricisini j hücrelerinden i hücrelerine x oranında gelerek terk eden soğuk akım

Eşitlik 13’ün Eşitlik 15’te yerine yazılmasıyla ısı değiştiricisi devresine giren akım sıcaklıklarına bağlı olarak çıkış sıcaklıklarını veren aşağıdaki eşitlik elde edilir.

$$T^o = O \cdot (E - \varepsilon \cdot S)^{-1} \cdot \varepsilon \cdot I \cdot T^i \quad (16)$$

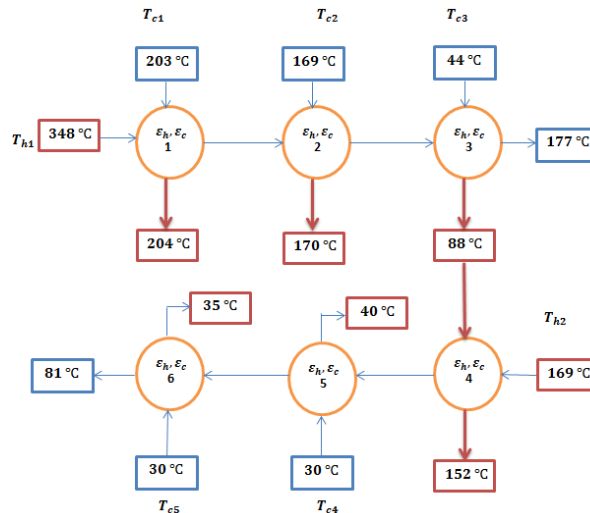
$$T^o = \varepsilon^S \cdot T^i \quad (17)$$

Eşitlik 17’deki  $\varepsilon^S$  matrisi  $(h+c) \times (h+c)$  boyutundadır ve  $\varepsilon^S$  matrisi bir ısı değiştiricisi devresinin çalışma karakteristiklerini barındırdığından  $\varepsilon^A$ ’ya benzer şekilde ifade edilmektedir [11].

#### 4. Kümen Üretim Tesisinde Statik Simülasyona Örnek Bir Uygulama

Kümen, benzen ve propilenin Friedel-Crafts alkilasyonu yöntemiyle alkillenmesi sonucu üretilmektedir [14]. Benzen ve propilenden, alkilasyon reaksiyonuyla kümen (iso-propilbenzen) elde edilen bir prosestir. Teknoloji, geniş bir saflık aralığındaki propilenin ve ekstraksiyon saflığındaki benzenin kullanılmasına olanak verir [1].

Kümen üretim prosesinde, propilen, benzenle birleştirilir, ısı değiştiriciden ve sıcak yağ veya buharla çalışan bir ön-ısıtıcıdan geçirilerek reaktöre beslenir. Reaktörden çıkan akım, iki-kademeli bir püskürtme sisteminden geçer. Sistemde bir de depropanizer kısmı bulunur. Püskürtmeyle reaksiyona girmemiş benzenin büyük bir kısmı ayrılır ve geri dönüşe verilir. Taze benzen depropanizer kısmına beslenir. Kümen zengin olan akım benzen kolonuna gelir; burada akımda kalan benzen ayrılarak geri dönüşe gönderilir. Kolonun dibinden çıkan kümen kil kulesinden geçirildikten sonra son fraksiyon kolonuna beslenir; burada, alkilasyon reaktöründe yan reaksiyonlarla oluşan az miktardaki ağır maddeler ayrılır. Kolon dibi, çoğunluğu diizopropilbenzen (DIPB) olan yüksek aromatik 72 yapıli bileşiklerdir. DIPB, transalkilasyon reaksiyonuyla ünitesinde tekrar kümene dönüştürülür [14].



Şekil 3. Isı değiştiricisi devresinin hücre modeli

#### 5. Statik Simülasyonunun Hazırlanması

##### 5.1. Isı değiştiricisi devresinin hücre modelinin hazırlanması ve hücre etkenlikleri

Tesisinde 2 adet sıcak akış 5 adet soğuk akış ile soğutulmaya tabi tutulmuştur. Hücre modellemesi yapılırken devre içerisindeki sıcaklık dağılımını görebilmek amacıyla her bir akışın girişi akışların karşılaştığı düğüm noktaları ve akışların çıkış noktaları gerçeğine uygun bir şekilde belirlenmiştir. Daha detaylı sıcaklık dağılımları elde etmek için devreye daha fazla hücre eklenerek işlemler yapılabilir. Isı değiştiricisi devresinin hücre modeli Şekil 4'te verilmiştir.

Isı değiştiricisi devresinde sıcak ve soğuk akıma ait etkenlikler hesaplandıktan sonra statik simülasyonun hazırlanması için, hücrelerin etkenliklerini tanımlayan matrisin yazılması gerekmektedir.

$$\varepsilon = \begin{bmatrix} 0.511 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.489 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.324 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.676 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.83125 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.16875 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.9877 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.0123 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.377 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.623 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.9808 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.0192 \\ 0.006896 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.993104 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.009259 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.990741 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.275 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.725 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.79 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.21 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.0724 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.9276 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.096 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.904 \end{bmatrix}$$

### 5.3. Yapı matrislerinin oluşturulması

Isı değiştiricisi devresindeki hücrelerin etkenliklerini ifade eden  $\varepsilon$  etkenlik matrisi tanımlandıktan sonra devre hücrelerinin birbirleri ile olan bağlantılarını yani akışın yolunu tanımlayan Yapı matrisleri ise,

$$S = \begin{bmatrix} S_{hh} & S_{hc} \\ S_{ch} & S_{cc} \end{bmatrix}$$

$$S_{hh} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$S_{ch} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$S = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

### 5.4. Giriş Yapan Akışların Tanımlanması

Şeklinde elde edilmiştir. Yapı matrisinin tanımlanması ısı değiştiricisindeki akışların tanımlanması için yeterli değildir. Devreye giriş yapan akışların giriş yaptığı noktaların da tanımlanması için Input matrisler aşağıdaki şekilde elde edilmiştir.

$$I_h = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$I_c = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$I = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

### 5.5. Çıkış yapan akışların tanımlanması

Aynı şekilde Output matris için ise sıcak ve soğuk akışkanın giriş ve çıkış noktaları dikkate alındığında aşağıdaki ifadeler elde edilir.

$$O_h = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$O_c = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$O = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

### 5.6. Giriş sıcaklıklarının tanımlanması

Son olarak ısı değiştiricisi devresine giriş yapan akışların sıcaklıklarını tanımlayan sıcaklık vektörü;

$$T^I = \begin{bmatrix} 348 \\ 169 \\ 203 \\ 169 \\ 44 \\ 30 \\ 30 \end{bmatrix}$$

şeklinde elde edilmiştir. Böylece devre çıkışındaki sıcak ve soğuk akışa ait çıkış sıcaklıklarını elde etmek için fonksiyon modelde gerekli olan bütün matrisler tamamlanmıştır.

### 5.7. Simülasyonun çözülmesi ve sonuçların elde edilmesi

Oluşturulan matrisler modelde yerlere koyularak denklem çözüldüğünde;

$$T^o = (E - \varepsilon S)^{-1} \varepsilon I T^I = \begin{bmatrix} 277.10 \\ 204.02 \\ 177.02 \\ 168.0 \\ 82.027 \\ 81.028 \\ 204.00 \\ 170.0 \\ 88.006 \\ 151.99 \\ 39.991 \\ 34.995 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Th_1^o \\ Th_2^o \\ Th_3^o \\ Th_4^o \\ Th_5^o \\ Th_6^o \\ Tc_1^o \\ Tc_2^o \\ Tc_3^o \\ Tc_4^o \\ Tc_5^o \\ Tc_6^o \end{bmatrix}$$

şeklinde elde edilmiştir. Bulunan bu vektör ısı değiştiricisi devresindeki hücrelerin çıkış sıcaklıklarını vermektedir. Aynı şekilde bulunan sonuçlar Input modelde yerine yazılarak



devre içindeki hücrelerin giriş sıcaklıklarını içeren  $T^i$  vektörü elde edilmektedir.  $T^o$  vektörü, Input modelde yerine koyulduğunda işlemin sonucu;

$$T^i = ST^o + IT^i = \begin{bmatrix} 348.0 \\ 277.1 \\ 204.02 \\ 169.0 \\ 168.0 \\ 82.027 \\ 203.0 \\ 169.0 \\ 44.0 \\ 88.006 \\ 30.0 \\ 30.0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Th_1^i \\ Th_2^i \\ Th_3^i \\ Th_4^i \\ Th_5^i \\ Th_6^i \\ Tc_1^i \\ Tc_2^i \\ Tc_3^i \\ Tc_4^i \\ Tc_5^i \\ Tc_6^i \end{bmatrix}$$

şeklinde elde edilmiştir. Bu işlemlerin sonucunda ısı değiştiricisi devresindeki bütün hücrelerden geçen her iki akışın giriş ve çıkış sıcaklıkları dolayısı ile ısı değiştiricisi içerisindeki sıcaklık dağılımı elde edilmiştir. Son olarak akışların ısı değiştiricisini devresini terk ettiği sıcaklıkları elde edilmesi için bulunan çıkış sıcaklıkları vektörünü ısı değiştiricisi devresinin çıkış noktalarını tanımlayan O vektörü ile çarpılması yeterlidir. Bu işlem aslında çıkış sıcaklıklarından hangilerinin son hücreye yani akışın devreyi terk ettiği hücreye at olduğunun belirlenmesi işlemidir. İşlem yapıldığında;

$$T^o = OT^o = \begin{bmatrix} 177.02 \\ 81.028 \\ 204.0 \\ 170.0 \\ 151.99 \\ 39.991 \\ 34.995 \end{bmatrix}$$

sonucu elde edilmektedir. Böylece ısı değiştiricisine yukarıda belirtilen sıcaklıklarda giren akışlar  $T^o$  vektöründe elde edilen sıcaklık değerlerinde sistemi terk etmektedir.

## 6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışma ile ısı değiştiricilerini hücrelere ayırma ve matrisleri kullanma metodunun, karmaşık yapıdaki ısı değiştiricisi sistemlerinin ısıl analizinde, karmaşık işlemlere ve iterasyona başvurmaksızın kesin sonuç elde etme imkânı verdiği ortaya konulmuştur. Bu çalışmada kullanılan simülasyonlardan doğru sonuç elde edilebilmesi için yapılacak kabuller doğru belirlenmeli, sistemin hücre modeli gerçeği birebir temsil edecek şekilde özenle hazırlanmalı, hücrelerdeki akış düzeneklerine göre hücre etkenliklerinin hesaplanması için uygun eşitlikler belirlenmeli ve etkenlik hesaplamalarında ısı transfer alanının toplam hücre sayısına bölünmesi gerektiği unutulmamalıdır. Sistemdeki akışların koordinatlarını veren input matrisi I, output matrisi O ve yapı matrisi S oluşturulurken hücre modelinin doğru bir şekilde aktarıldığından emin olunmalıdır.

Etkenliklerden yararlanarak oluşturulan bu simülasyon sonucunda, ısı değiştiricisi devresinin detaylı sıcaklık dağılımı elde edilmiş ve işletme şartları ile bire bir uyuşan sonuçlar elde edilmiştir. Simülasyon sonucunda devre içerisindeki sıcaklık dağılımları kolaylıkla incelenerek ısı değiştiricisi devresinin etkin tasarlanıp tasarlanmadığı, sıcaklık dalgalanmalarına bakılarak tespit edilebilmektedir. Bu yönüyle uygulanan simülasyon yöntemi ısı geri kazanımı sektöründe çalışan mühendisler tarafından daha fazla ısının geri kazanıldığı daha az alana ihtiyaç duyulan bir devrenin tasarlanmasında kolay uygulanabilen, kısa zamanda kesin sonuca ulaşmasını sağlayan yardımcı bir araç olarak kullanılabilir.

## 7.KAYNAKLAR

- [1] Gül D, Giva A, Karacan S, Kümen Üretimini Yapıldığı Tepkimeli Bir Damıtma Kolonunun Benzetimi, Onuncu Ulusal Kimya Mühendisliği Kongresi, 3-6 Eylül 2012, Koç Üniversitesi, İstanbul
- [2] D. Gvozdenac (2012). Analytical Solution of Dynamic Response of Heat Exchanger, Heat Exchangers – Basics Design Applications, Dr. Jovan Mitrovic (Ed.), ISBN: 978-953-51-0278-6
- [3] Varbanov, P., Klemeš, J. and Friedler, F., Cell-based dynamic heat exchanger models – direct determination of the cell number and size, Computers and Chemical Engineering, 35 (5): 943–948 (2011).
- [4] Wolf, E. A., Mathisan, K. W. and Skogestad, S., Dynamics and controllability of heat exchanger networks, European Federation Chemical Engineerin Symposium Cope 91, Barcelona, 117-122 (1991)
- [5] Boriboonsri, P. and Kittisupakorn, P., Study of dynamic behavior of heat exchanger system in hard chrome electroplating, Proceedings of the International MultiConference of Engineers and Computer Scientists, Hong Kong, 1: 520-525 (2009).
- [6] Schaal, L. and Feidt, M., Optimization of the dynamic behavior of a heat exchanger subject to fouling comparison of three optimization models, Int. J. Applied Thermodynamics, 2 (2): 89-96 (1999).
- [7] Rennie, T. J., Numerical and experimental studies of a double-pipe helical heat exchanger, Doctor of Philosophy Thesis, Department of Bioresource Engineering, Montreal, 2, (2004).
- [8] Evangelista, F., Dynamics of double pipe heat exchangers: explicit time domain solutions, Department of Chemistry, Chemical Engineering and Materials, Italy, 11: 271-278 (2011).
- [9] Triratana, P., Narataruksa, P., Suppamassadu, K. P., Heggs, P. J. and Tia, S., Dynamic simulation of plate and frame heat exchanger undergoing food fouling: coconut milk fouling case study, ScienceASia, 34 (2008): 22-237 (2008).
- [10] Lou, X., Guan X., Li, M. and Roetzel, W., Dynamic behaviour of one-dimensional flow multistream heat exchangers and their networks, International Journal of Heat and Mass Transfer, 46 (4): 705–715 (2003).
- [11] Strelow, O., Eine allgemeine Berechnungsmethode für Wärmeübertrager Shaltungen, Forch Ingenieurwes, 63 (1997): 255-261 (1997).
- [12] Navarro, H. A. and Cabezas-Gómez, L. C., Effectiveness-Ntu computation with a mathematical model for cross-flow heat exchangers, Brazilian Journal of Chemical Engineering, 24 (4): 509 – 521 (2007)

- [13] Strelow, O., A general calculation method for plate heat exchangers, *Int. J. Therm. Sci.*, 39 (6): 645–658 (1999).
- [14] *Hydrocarbon Processing*, March 1991, p.121-192 (U.S. Gulf Coast).