

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

79084

# ISI DEĞİŞTİRİCİ AĞLARININ SUPERTARGET PAKET PROGRAMI İLE TASARIMI

Kimya Müh. Ebru DOĞRU

F.B.E. Kimya Mühendisliği Anabilim Dalında Hazırlanan

YÜKSEK LİSANS TEZİ

79084

Tez Danışmanı: Doç.Dr. Esen BOLAT

Doç. Dr. Esen Bolat E Bolat  
Prof. Dr. İsmail Teke İsmail Teke  
Prof. Dr. S. Gültekin Selahattin Gültekin

İSTANBUL, 1998

İ.C. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU  
DANIŞMANLIK MERKEZİ

## TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tezimin hazırlanmasında beni yönlendiren Sayın **Doç. Dr. Esen BOLAT**'a, Kimya Mühendisliği Bölüm Başkanı Sayın **Prof. Dr. Salih DİNÇER**'e ve yardımlarından dolayı **Araş. Gör. Semra ÖZKAN** ve **Araş.Gör. Fevzi ÖZKAN**'a teşekkür ederim. Ayrıca, mali destek sağlayan **Yıldız Teknik Üniversitesi Araştırma Fonuna (YTÜAF 96-A-07-01-01)** teşekkür ederim.



# İÇİNDEKİLER

SİMGE LİSTESİ.....	i
KISALTMA LİSTESİ.....	ii
ŞEKİL LİSTESİ.....	iii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	iv
ÖZET.....	v
ABSTRACT.....	vi
1. GİRİŞ.....	1
2. ISI DEĞİŞTİRİCİ AĞLARININ TASARIMINDA DARBOĞAZ ANALİZİ.....	2
2.1 Sıcaklık – Entalpi Diyagramı.....	2
2.2 Bileşik Eğriler ve Darboğaz.....	4
2.3 Problem Çizelge Algoritması.....	7
2.4 Isı Geri Kazanımı Darboğazı.....	11
2.5 Büyük Bileşik Eğri.....	14
2.6 Ağ Diyagramı.....	15
2.7 Darboğaz Tasarım Yöntemi.....	17
2.7.1 Darboğazda olabilirlik kriterleri.....	17
2.7.2 Akım bölünmesi (Proses akımları ve kollarının sayısı).....	17
2.7.3 Tasarıma darboğazdan başlama.....	18
2.7.4 Bireysel eşlenmeler için CP eşitsizliği.....	19
2.7.5 CP çizelgesi.....	19
2.7.6 İşaretleme kuralı.....	20
2.8 Tasarım Yönteminin Özeti.....	20
2.8.1 HEN tasarımı.....	20
2.8.2 MER tasarımı.....	21
3. ISI DEĞİŞTİRİCİ AĞLARININ YATIRIM ve TOPLAM MALİYET HEDEFLERİ.....	22
3.1 $\Delta T_{min}$ 'un Önemi.....	22
3.2 Minimum Isı Aktarım Alanı Hedefi.....	23
3.2.1 Minimum alan modelinde farklı ısı aktarım katsayıları.....	25
3.3 Isı Değiştirici Ağlarının Maliyet Analizi.....	27
3.3.1 Yatırım maliyeti.....	28
3.3.2 Faiz geri ödemelerini içermeyen yıllık maliyet.....	28
3.3.3 Faiz geri ödemelerini içeren yıllık maliyet.....	28
3.3.4 Enerji maliyetinin net bugünkü değeri.....	28
3.3.5 Geri ödeme süresi.....	29

4.	UYGULAMALAR.....	30
5.	SONUÇLAR.....	47
	KAYNAKLAR.....	48
	EKLER.....	50
	ÖZGEÇMİŞ.....	60



## SİMGE LİSTESİ

$A_i$	$i$ entalpi aralığındaki yüzey alanı
$A_{min}$	Minimum toplam alan
$CP_c$	Soğuk akımların ısı kapasiteleri
$CP_h$	Sıcak akımların ısı kapasiteleri
$EM_{yillik}$	Yıllık enerji maliyeti
$h_i$	$i$ akımının ısı aktarım katsayısı
$i$	Faiz yüzdesi
$N_c$	Soğuk akımların sayısı
$N_{cu}$	Soğuk servis akımlarının sayısı
$N_h$	Sıcak akımların sayısı
$N_{hu}$	Sıcak servis akımlarının sayısı
$N_{hx,min}$	Minimum birim sayısı
$q_i$	$i$ akımının ısı yükü
$Q_{c,min}$	Minimum soğuk servis akımı ısı yükü
$Q_{h,min}$	Minimum sıcak servis akımı ısı yükü
$YM_{kurulus}$	Isı değiştiricilerin kurma maliyeti
$YM_{yillik}$	Yıllık yatırım maliyeti
$T_{ci}$	Soğuk akımın giriş sıcaklığı
$T_{co}$	Soğuk akımın çıkış sıcaklığı
$T_{hi}$	Sıcak akımın giriş sıcaklığı
$T_{ho}$	Sıcak akımın çıkış sıcaklığı
$T_d$	Darboğaz sıcaklığı
$T_{cd}$	Soğuk akımların darboğaz sıcaklığı
$T_{hd}$	Sıcak akımların darboğaz sıcaklığı
$T_s$	Akımların besleme sıcaklığı
$T_T$	Akımların hedef sıcaklığı
$TM_{yillik}$	Yıllık toplam maliyet
$U$	Toplam ısı aktarım katsayısı
$\Delta H$	Entalpi aralığı
$\Delta T_{min}$	Minimum sıcaklık farkı

## **KISALTMA LİSTESİ**

<b>HEN</b>	<b>Isı değiştirici ağı (Heat Exchanger Network)</b>
<b>MER</b>	<b>Maksimum enerji geri kazanımı(Maximum Energy Recovery)</b>



## ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1	Bir sıcak akımın bir soğuk akımla entegrasyonu.....	3
Şekil 2.2	Sıcak ve soğuk akımlar.....	4
Şekil 2.3	Sıcak ve soğuk bileşik eğriler.....	5
Şekil 2.4	Minimum sıcak servis akımı ısı yükü, minimum soğuk servis akımı ısı yükü ve geri kazanılabilir ısı miktarı.....	6
Şekil 2.5	Akım verilerine göre çizilen sıcak ve soğuk bileşik eğriler.....	7
Şekil 2.6	Bileşik eğrilerin kaydırılması.....	8
Şekil 2.7	Kaydırılmış sıcaklık aralığında ısı denklığı.....	10
Şekil 2.8	Kademeli diyagram.....	10
Şekil 2.9	Proses ısı kaynağı ve ısı kuyusu.....	12
Şekil 2.10	Darboğazın önemi.....	12
Şekil 2.11	Darboğazda proseten prosese ısı aktarımı.....	13
Şekil 2.12	Büyük bileşik eğri.....	14
Şekil 2.13	Ağ diyagramı.....	15
Şekil 3.1	Isı değiştirici ağlarında enerji – yatırım ilişkisi ve $\Delta T_{min}$ 'un saptanması.....	22
Şekil 3.2	Bileşik eğrilerde i entalpi aralığındaki ısı aktarımı.....	24
Şekil 4.1	Aromatik tesisin akış şeması.....	30
Şekil 4.2	$\Delta T_{min}=10^{\circ}\text{C}$ için bileşik eğriler.....	32
Şekil 4.3	$\Delta T_{min}=10^{\circ}\text{C}$ için büyük bileşik eğriler.....	32
Şekil 4.4	$\Delta T_{min}=10^{\circ}\text{C}$ için ağ diyagramı.....	36
Şekil 4.5	$\Delta T_{min}=26^{\circ}\text{C}$ için bileşik eğriler.....	37
Şekil 4.6	$\Delta T_{min}=26^{\circ}\text{C}$ için büyük bileşik eğriler.....	37
Şekil 4.7	$\Delta T_{min}=26^{\circ}\text{C}$ için ağ diyagramı.....	41
Şekil 4.8	$\Delta T_{min}$ - maliyet grafiği.....	43

## ÇİZELGE LİSTESİ

Çizelge 2.1	Akım verileri.....	6
Çizelge 2.2	Kaydırılmış akım sıcaklıkları.....	9
Çizelge 2.3	Darboğazın üstündeki ısı değiştiricilerin verileri.....	16
Çizelge 2.4	Isıtıcıların verileri.....	16
Çizelge 2.5	Darboğaz altındaki ısı değiştiricinin verileri.....	16
Çizelge 2.6	Soğutucunun verileri.....	16
Çizelge 4.1	Proses akım verileri.....	31
Çizelge 4.2	Servis akım verileri.....	31
Çizelge 4.3	Maliyet verileri.....	31
Çizelge 4.4	Darboğazın üstünde eşlenme olurluğu ( $\Delta T_{\min}=10^{\circ}\text{C}$ ).....	33
Çizelge 4.5	Darboğazın altında eşlenme olurluğu ( $\Delta T_{\min}=10^{\circ}\text{C}$ ).....	33
Çizelge 4.6	Darboğazın altındaki eşlenmeler ( $\Delta T_{\min}=10^{\circ}\text{C}$ ).....	34
Çizelge 4.7	Darboğazın üstündeki eşlenmeler ( $\Delta T_{\min}=10^{\circ}\text{C}$ ).....	34
Çizelge 4.8	$\Delta T_{\min}=10^{\circ}\text{C}$ için enerji maliyeti.....	35
Çizelge 4.9	$\Delta T_{\min}=10^{\circ}\text{C}$ için yatırım maliyeti.....	35
Çizelge 4.10	$\Delta T_{\min}=10^{\circ}\text{C}$ için toplam maliyet.....	37
Çizelge 4.11	Darboğazın üstünde eşlenme olurluğu ( $\Delta T_{\min}=26^{\circ}\text{C}$ ).....	38
Çizelge 4.12	Darboğazın altında eşlenme olurluğu ( $\Delta T_{\min}=26^{\circ}\text{C}$ ).....	38
Çizelge 4.13	Darboğazın üstündeki eşlenmeler ( $\Delta T_{\min}=26^{\circ}\text{C}$ ).....	39
Çizelge 4.14	Darboğazın altındaki eşlenmeler ( $\Delta T_{\min}=26^{\circ}\text{C}$ ).....	40
Çizelge 4.15	$\Delta T_{\min}=26^{\circ}\text{C}$ için enerji maliyeti.....	40
Çizelge 4.16	$\Delta T_{\min}=26^{\circ}\text{C}$ için yatırım maliyeti.....	42
Çizelge 4.17	$\Delta T_{\min}=26^{\circ}\text{C}$ için toplam maliyet.....	42
Çizelge 4.18	Tasarım çizelgesi.....	42
Çizelge 4.19	Faiz geri ödemelerini içermeyen yıllık maliyet yöntemi için maliyet değerleri ( $\Delta T_{\min}=10^{\circ}\text{C}$ ).....	44
Çizelge 4.20	Faiz geri ödemelerini içermeyen yıllık maliyet yöntemi için maliyet değerleri ( $\Delta T_{\min}=26^{\circ}\text{C}$ ).....	44
Çizelge 4.21	Faiz geri ödemelerini içeren yıllık maliyet yöntemi için maliyet değerleri ( $\Delta T_{\min}=10^{\circ}\text{C}$ ).....	45
Çizelge 4.22	Faiz geri ödemelerini içeren yıllık maliyet yöntemi için maliyet değerleri ( $\Delta T_{\min}=26^{\circ}\text{C}$ ).....	45
Çizelge 4.23	Net bugünkü değer yöntemi için maliyet değerleri ( $\Delta T_{\min}=10^{\circ}\text{C}$ ).....	46
Çizelge 4.24	Net bugünkü değer yöntemi için maliyet değerleri ( $\Delta T_{\min}=26^{\circ}\text{C}$ )....	46



## ÖZET

Günümüzde, enerji tüketiminin ve toplam maliyetlerin minimize edilmesi, prosesler için önemli bir gereksinim haline gelmiştir. Bu sebeple, proses entegrasyonu yapılmaktadır. Bu amaçla çeşitli yöntemler geliştirilmiştir. Bu yöntemlerden biri, ısı değiştirici ağlarının tasarımında kullanılan *Darboğaz Analiz Yöntemidir*. Darboğaz analizinde, başlangıç noktası, prosesin madde ve enerji denklikleridir. Bu başlangıç noktasından hareketle, servis akımlarının tüketimi, ısı aktarım alanı, yatırım maliyeti, işletme maliyeti gibi parametrelerden birinin ya da birkaçının minimize edilmesi hedeflenir.

Bu çalışmada, Darboğaz Analizi Yönteminin temel prensipleri ve uygulanması ile ilgili bilgiler verilmiştir. Ayrıca, ısı değiştirici ağlarının tasarımında darboğaz analizi yapan *SuperTarget* paket programı kullanılarak, belli akım verileri için hesaplamalar yapılmıştır. Bir optimum tasarıma ulaşabilmek amacıyla,  $\Delta T_{\min}$  (darboğaz noktasını gösteren, kabul edilebilir minimum sıcaklık farkı) kısıtı değiştirilerek, bu değişimin ısı aktarım alanı, enerji maliyeti ve toplam maliyet üzerindeki etkileri incelenmiştir.

**Anahtar kelimeler:** ısı entegrasyonu, ısı değiştirici ağları, darboğaz, maliyet.

## **ABSTRACT**

**Nowadays, the minimization of energy consumption and total cost became an important requirement for processes. For this reason, process integration is done. For this purpose, many methods were developed. One of these methods is *Pinch Analysis Method*, used in the design of heat exchanger networks. In the pinch analysis method, the initial point is the mass and energy balances of the process. Starting from this initial point, minimization of utilities consumption, heat transfer area, operating cost and capital cost were targeted.**

**In this study, information on basic principles and application of Pinch Analysis Method was given. Also, calculations for certain stream data were done by using the *SuperTarget* software that uses this method in the design of heat exchanger networks. For the objective of reaching an optimum design, by changing the  $\Delta T_{\min}$  (the minimum permissible temperature difference, indicating the pinch point) restriction, the effects of this change on the heat exchange area, energy cost and total cost were examined.**

**Key words: heat integration, heat exchanger networks, pinch, cost.**

## 1. GİRİŞ

Çevre kısıtlamaları arttıkça ve ekonomik durumlar değiştikçe, tesisler daha az enerji kullanımı yönüne itilmektedir. Dolayısıyla, sanayi, enerji kullanımını geliştirecek bir stratejiyi belirlemede uzun vadeli bakmak zorundadır (Rudman, 1995). Bu amaca ulaşmak üzere sistematik yöntemlerin geliştirilmesi, kimya mühendisliğinde önemli bir ilgi alanı oluşturmaktadır.

1970'lerin sonunda, darboğaz teknolojisi, ısı değiştirici ağlarının tasarımında, o yıllardaki enerji krizine karşı bir araç olarak ortaya çıktı. Bu yöntemin en önemli katkısı, mühendislere, etkileşimli kullanılabilen basit kavramları sunmasıdır. Yöntemin temel prensipleri ısı ve termodinamiğe dayanır, temel stratejisi ise tasarım öncesinde hedefleri koymaktır (Linnhoff, 1993).

Isı değiştirici ağı (HEN\*) tasarımı, kimyasal proseslerin tasarımında çok önemli bir yer tutar. Tipik olarak geliştirilmiş bir HEN tasarımıyla hazırlanan akım şemaları kullanılarak, sermaye tasarrufunun yanında, %20-30 enerji tasarrufu da sağlanabilir. Bir HEN tasarımında uygulanan darboğaz analizi, proses akımlarını, bilinen besleme şartlarından belirtilen hedef sıcaklık değerlerine ısıtmak ya da soğutmak üzere, proses ve servis akımı ısı değiştiricilerinin uygun yerleştirilmesi ile ilgilidir. Amaç, toplam maliyeti, yani yıllık ödemeler cinsinden ifade edilen yatırım ve işletme maliyetlerinin toplamını minimize etmektir.

Darboğaz analizi, ağ sıcaklık darboğazı ve ağ performans hedefleri olarak bilinen kavramları içerir. Ağ sıcaklık darboğazı, HEN tasarımında olabilir maksimum ısı geri kazanımının; ağ performans hedefleri ise olabilir minimum servis akımı kullanımının ve minimum toplam yüzey alanının, dolayısıyla minimum birim (yani proses ve servis akımı ısı değiştiricileri) sayısının saptanmasında kullanılır. Bu hedeflerin hesaplanması kolaydır ve tasarımdan bağımsızdır. Bu hedefler, daha iyi tasarımlara ulaşmak amacıyla kullanılabilir (Linnhoff ve Hindmarsh, 1983 ).

---

\* HEN: İngilizcede *Heat Exchanger Network* kelime grubunun kısaltılmış şekli.

## 2. ISI DEĞİŞTİRİCİ AĞLARININ TASARIMINDA DARBOĞAZ ANALİZİ

Isı değiştirici ağlarında, buhar kullanılarak soğuk akımlar ısıtılır, soğutma suyu kullanılarak da sıcak akımlar soğutulur. Bu amaçla, genellikle 180°C’da buhar ve 20°C’da soğutma suyu kullanılır. Ancak, bu tip bir uygulama, aşırı enerji maliyetine neden olur. Bu sebeple, ısı geri kazanımı için çaba harcanır. Bu amaçla geliştirilen darboğaz yaklaşımı, aşağıdaki kabullere dayanır:

- 1- Tüm ısı aktarımları karşıt akışlı ısı değiştiricilerde yer alır.
- 2- Her akımın ortalama özgül ısısı sabittir.
- 3- Her akımın entalpisi sadece sıcaklığa bağlıdır.
- 4- Kinetik ve potansiyel enerji değişiklikleri ihmal edilebilir.
- 5- Çevreye olan ısı aktarımı ihmal edilebilir.

### 2.1 Sıcaklık-Entalpi Diyagramı

Sıcaklık–entalpi diyagramları, HEN analizinde temel rol oynar. Şekil 2.1’de biri sıcak akım (HS) diğeri soğuk akım (CS) olmak üzere iki akımlı bir diyagram verilmektedir. Sıcak akım, giriş (besleme) sıcaklığı  $T_{hi}$ ’den, çıkış (hedef) sıcaklığı  $T_{he}$ ’ye soğutulur; soğuk akım ise giriş (besleme) sıcaklığı  $T_{ci}$ ’den, çıkış (hedef) sıcaklığı  $T_{ce}$ ’ye ısıtılır. Akımların yn oklar ile belirtilmiştir.

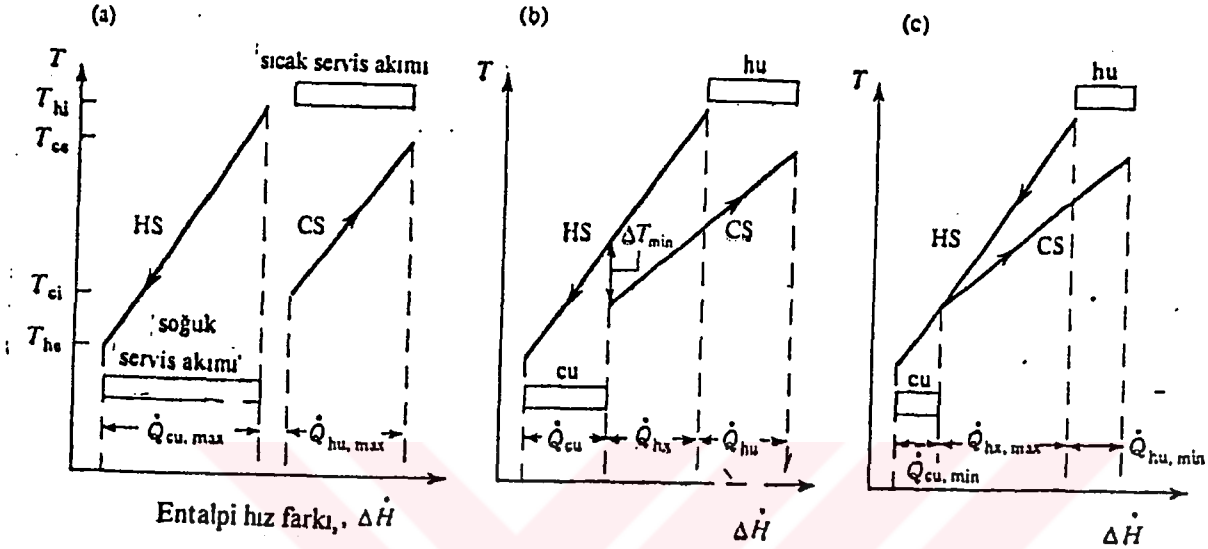
Yukarıda verilen kabuller temelinde, sıcak ve soğuk akımların ısı aktarım miktarları aşağıdaki denklemler ile verilir:

$$Q_h = m_h C_{ph} (T_{he} - T_{hi}) \quad (2.1)$$

$$Q_c = m_c C_{pc} (T_{ce} - T_{ci}) \quad (2.2)$$

Isıtma ve soğutma amaçları için, bir soğuk servis akımı (soğutma suyu) ve bir sıcak servis akımı (su buharı) bulunur. Bunların ısı yükleri sırasıyla  $Q_{cu}$  ve  $Q_{hu}$ ’dur. Bu düzenleme (Şekil 2.1a) ile maksimum servis akımı yükleri saptanır ( $Q_{cu,maks.}$  ve  $Q_{hu,maks.}$ ). Tüm tasarım

alternatifleri içinde, bu durum, en düşük yatırım ve en yüksek servis akımı maliyetleri ile tanımlanır. Dolayısıyla, servis akımı maliyetleri, yatırım maliyetleri ve iki akımın sıcaklıkları düşünüldüğünde, Şekil 2.1a'daki düzenlemenin minimum maliyet yönünden optimum olmadığı görülür.



Şekil 2.1 Bir sıcak akımın bir soğuk akımla entegrasyonu

Şekil 2.1b'de gösterildiği gibi, soğuk akım entalpi eksenine paralel kaydırılarak elde edilen düzenleme ile, soğuk akımın kısmi ısıtılması soğuk akımın kısmi soğutulmasıyla yapılabilir. Sıcak akımın soğuk akımla örtüştüğü entalpi aralığı, ısı değiştirici yükü  $Q_{hx}$ 'e karşılık gelir. Isı değiştirici içinde minimum sıcaklık farkının ( $\Delta T_{min}^*$ ) olduğu bölge, *darboğaz noktası* ya da basitçe *darboğaz* olarak bilinir. Darboğazdaki sıcaklık farkı, ısı değiştirici içindeki ısı aktarımını ve ısı aktarım alanı  $A_{hx}$ 'in büyüklüğünü etkiler. Soğuk akımın paralel olarak kaydırılması, sıcaklık farkının aynı zamanda servis akımlarının yüklerinin bir ölçüsü olduğunu da gösterir. Daha küçük bir  $\Delta T_{min}$ , daha geniş  $Q_{hx}$  ve  $A_{hx}$  ve daha küçük  $Q_{hu}$  ve  $Q_{cu}$  verir.

\*  $\Delta T_{min}$ : Bir ısı değiştiricinin sıcak ucunda (sıcak akımın girdiği, soğuk akımın çıktığı uç) ya da soğuk ucunda (soğuk akımın girdiği, sıcak akımın çıktığı uç) olması gereken minimum sıcaklık farkı.

Şekil 2.1c'de termodinamik yönden en iyi olan düzenleme görülür.  $\Delta T_{\min} = 0$ ,  $Q_{\text{hu,min}}$  ve  $Q_{\text{cu,min}}$ . Ancak,  $\Delta T_{\min} = 0$  durumunda, sonsuz ısı aktarım alanı ve sonsuz yatırım maliyeti gerekir. Bu ise pratik olarak mümkün değildir.

Sistemde yalnızca iki akımın olması durumunda, ısı değiştiricideki darboğazın yeri, bu iki akımın ısı kapasitelerine ( $mC_p \equiv CP$ ) bağlıdır. Böylece;

$m_h.Cp_h > m_c.Cp_c$  : Darboğaz, ısı değiştiricinin sıcak ucunda görülür.

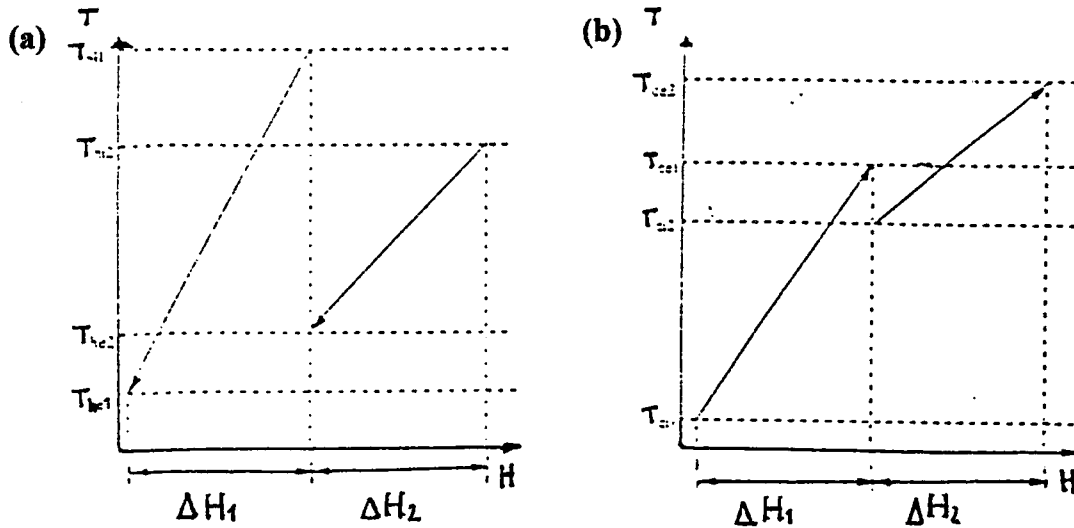
$m_h.Cp_h < m_c.Cp_c$  : Darboğaz, ısı değiştiricinin soğuk ucunda görülür.

$m_h.Cp_h = m_c.Cp_c$  : Sıcaklık – entalpi farkı diyagramındaki profiller paraleldir.  
Darboğaz oluşmaz.

## 2.2 Bileşik Eğriler ve Darboğaz

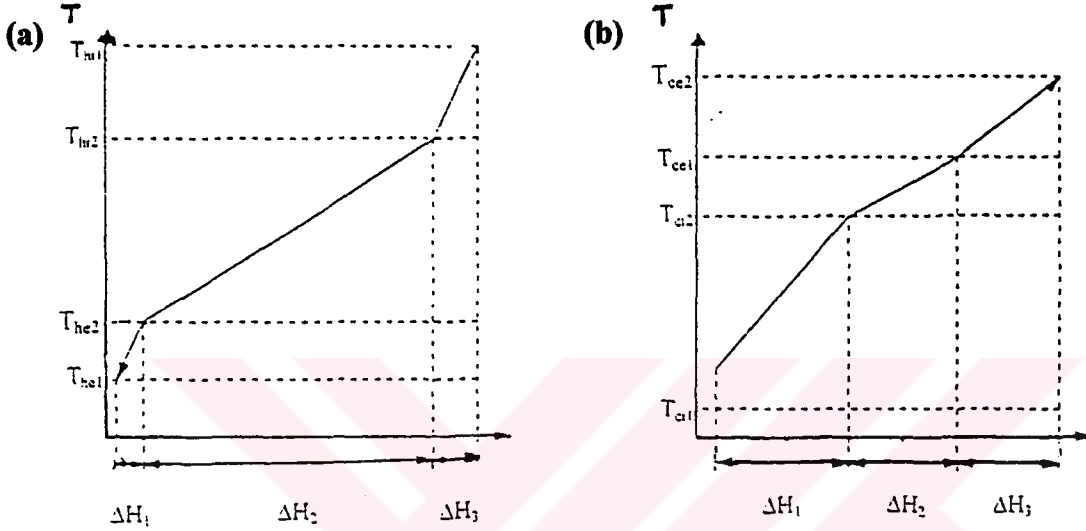
Isı değiştirici ağlarının analizinde, öncelikle, madde ve enerji denklikleri temelinde, ısı kaynakları (ısı veren sıcak akımlar) ve ısı kuyuları (ısı alan soğuk akımlar) belirlenir (Smith, 1995).

Giriş ve çıkış sıcaklıkları bilinen sıcak ve soğuk akımlar sıcaklık-entalpi (T-H) diyagramında Şekil 2.2'deki gibi gösterilebilir.



Şekil 2.2 Sıcak ve soğuk akımlar. (a) sıcak akımlar, (b) soğuk akımlar

Sıcaklık-entalpi (T-H) diyagramında tek tek gösterilen akımlar, verilen sıcaklık aralığında birleştirilir ve bir bütün olarak hareketleri saptanabilir. Her sıcaklık aralığındaki akımlar, bir bileşik akım oluşturmak üzere birleştirilir. Bu bileşik akım, her sıcaklık aralığında, tek tek akımların CP değerlerinin toplamına eşit olan bir CP'ye sahiptir. Bu bileşiğin entalpi değişimi de, tek tek akımların entalpi değişimlerinin toplamına eşittir ( $\Delta H = \Delta T \sum CP$ ).

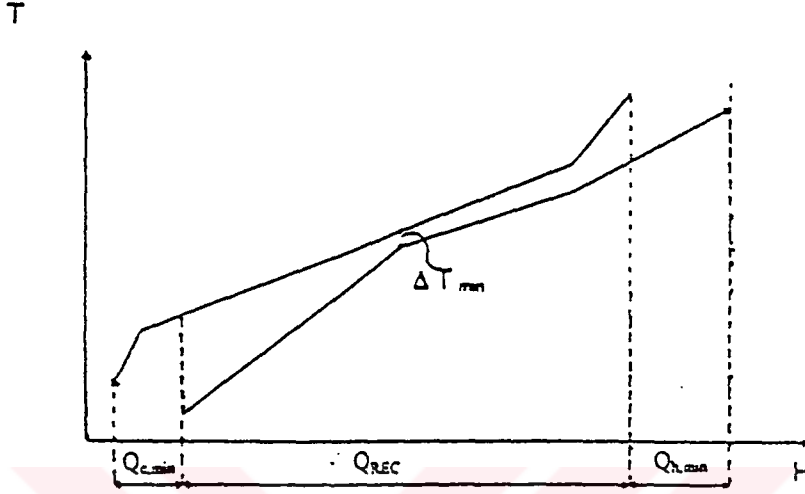


Şekil 2.3 Sıcak ve soğuk bileşik eğriler. (a) sıcak bileşik eğri, (b) soğuk bileşik eğri

Sıcak akımların verilen sıcaklık aralığında birleştirilmesiyle, tüm sıcak akımların **sıcak bileşik eğri**'si; ve benzer şekilde, soğuk akımların verilen sıcaklık aralığında birleştirilmesiyle, tüm soğuk akımların **soğuk bileşik eğri**'si elde edilebilir (Şekil 2.3).

Elde edilen iki bileşik eğri, ortak bir T-H diyagramında çizilerek, ısı geri kazanımı hedefi tanımlanabilir. Bu eğriler, aralarında bir minimum sıcaklık farkı ( $\Delta T_{min}$ ) olacak şekilde çizilir. İki akım arasında bir ısı değişiminin yer alabilmesi için; sıcak akımlar tüm noktalarda soğuk akımlardan daha sıcak olmalıdır. T-H diyagramında her iki bileşik eğrinin de bulunduğu bölge, geri kazanılabilir ısı ( $Q_{REC}$ ) miktarını verir. Diyagramda, sıcak bileşik eğrinin başlangıcının ötesine taşan soğuk bileşik eğri, ısı geri kazanım ile ısıtılmaz ve buhar gerektirir. Gerekli ısı, minimum sıcak servis akımı miktarı ile sağlanır ve  $Q_{h,min}$  olarak bilinir. Soğuk bileşik eğrinin başlangıcının ötesine uzanan sıcak bileşik eğri, geri kazanılan ısı ile soğutulamaz ve soğutma suyu gerektirir. Bu ısı ise minimum soğuk servis akımı miktarı ile sağlanır ve  $Q_{c,min}$  olarak bilinir. Bu durumlar, Şekil 2.4'de şematik olarak gösterilmiştir.

Eğrilerin örtüştüğü yerlerde, sıcak bileşik eğriyi oluşturan sıcak akımlardan, dikey olarak, soğuk bileşik eğrinin içerdiği soğuk akımlara ısı boşaltılır. Bileşik eğrilerin çizim şekline göre, eğriler arasındaki örtüşme maksimum yapılabilir ve dolayısıyla ısı geri kazanımı maksimum olabilir. Bu şekilde, bileşik eğriler, enerji hedeflerinin tayini için kullanılabilir.



Şekil 2.4 Minimum sıcak servis akımı ısı yükü, minimum soğuk servis akım ısı yükü ve geri kazanılabilir ısı miktarı

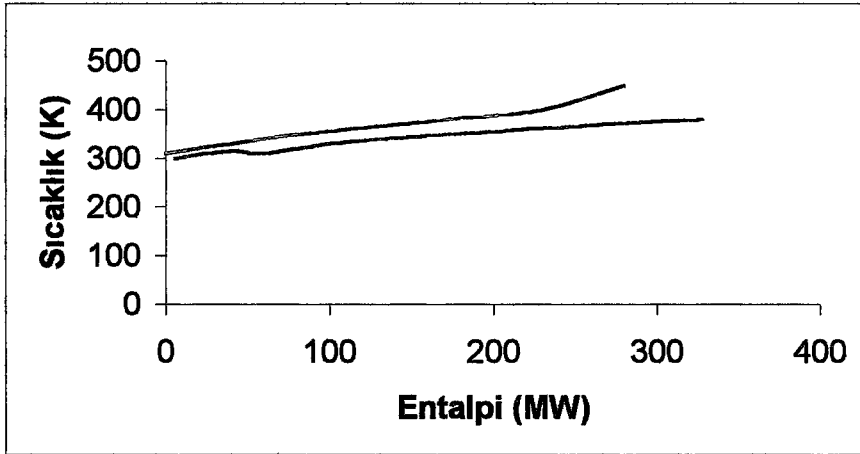
Buraya kadar anlatılanlar, sayısal olarak aşağıda verilmektedir. Çizelge 2.1’de iki sıcak ve iki soğuk akım içeren bir örneğin akım verileri verilmektedir.

Çizelge 2.1 Akım verileri

Akım No	Akım Tipi	Isı Kapasitesi CP (MW/K)	Besleme Sıcaklığı $T_s$ (K)	Hedef Sıcaklığı $T_T$ (K)
1	Sıcak ( $H_1$ )	2	400	310
2	Sıcak ( $H_2$ )	1	450	350
3	Soğuk ( $C_1$ )	1,8	300	390
4	Soğuk ( $C_2$ )	4	330	370

Bu çizelgede verilen akım verileri kullanılarak çizilen T-H grafiği, Şekil 2.5’de gösterilmektedir. Grafikteki mavi eğri soğuk bileşik eğriyi, kırmızı eğri ise sıcak bileşik eğriyi göstermektedir.





Şekil 2.5 Akım verilerine göre çizilen sıcak ve soğuk bileşik eğriler

Şekil 2.5’de, akımların kaynak ve hedef sıcaklıkları temelinde entalpi denge aralıklarının nasıl oluşturulduğu gösterilmiştir. Aynı yolla, maksimum olabilir ısı değişimi miktarına izin vermek üzere, sıcak ve soğuk akımlar bir bütün halinde gösterilebilir. Burada, herhangi bir entalpi aralığında, sıcak ve soğuk akımların birbirinden en az  $\Delta T_{\min}$  kadar uzakta olmaları sağlanmalıdır (Linnhoff ve Hindmarsh, 1983; Linnhoff, 1994).

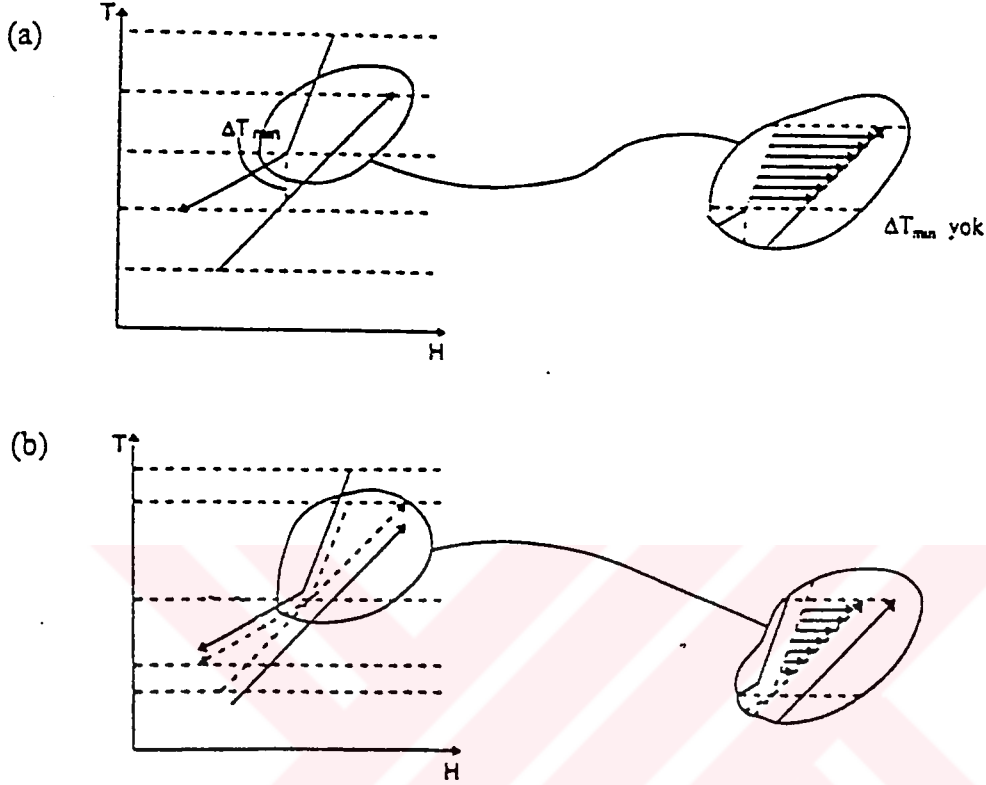
Bu sayısal veriler için, T-H grafiğinden,  $\Delta T_{\min}=10^{\circ}\text{C}$  için, sıcak ve soğuk akımlarının darboğazdaki sıcaklıkları sırasıyla, 340 ve 330 K olarak bulunmuştur. Grafikten, sıcak servis akımının ısı yükü 48 MW, soğuk servis akımının ısı yükü ise 6 MW olarak bulunmuştur.

### 2.3 Problem Çizelge Algoritması

Enerji hedefleri bileşik eğriler kullanılarak kestirilebilir, ancak bu yaklaşım grafiksel bir yapıya dayandırıldığından, pek uygun değildir. Enerji hedeflerinin grafiksel yapıya ihtiyaç duyulmadan hesaplanması için, *problem çizelge algoritması* geliştirilmiştir (Smith, 1995).

Proses, önce sıcaklık aralıklarına ayrılır. Ancak, sıcaklık farkları aralık boyunca uygun değerlerde olmayabilir ve her sıcaklık aralığında tüm ısıyı geri kazanmak imkansız olabilir (Şekil 2.6a). Problem çizelge algoritmasına göre, sıcak bileşik eğri pratikten  $\Delta T_{\min}/2$  daha

soğuk, soğuk bileşik eğri ise pratikten  $\Delta T_{\min} / 2$  daha sıcak sayılırsa, bu problem aşılır (Şekil 2.6b).



Şekil 2.6 Bileşik eğrilerin kaydırılması

Bu durumda *kaydırılmış bileşik eğriler* darboğazda birbirine dokunur. Ancak pratikte, sıcak akımlar  $\Delta T_{\min}/2$  daha sıcak ve soğuk akımlar  $\Delta T_{\min}/2$  daha soğuk olduğundan, her bir kaydırılmış sıcaklık aralığında, sıcak akımlar soğuk akımlardan  $\Delta T_{\min}$  kadar daha sıcaktır. Kaydırılmış sıcaklık aralığında kaydırılmış bileşik eğriler arasındaki ısı denge, her bir kaydırılmış sıcaklık aralığında ısı aktarımının olabileceğini gösterir.

Problem çizelge algoritmasının nasıl uygulandığı, Çizelge 2.1'de verilen akım verileri için, şöyle gösterilebilir:

- 1- Proses darboğazında,  $\Delta T_{\min}$  için bir optimum değer belirlenir.
- 2- Sıcak akımların sıcaklıkları  $\Delta T_{\min}/2$  kadar azaltılarak ve soğuk akımların sıcaklıkları  $\Delta T_{\min}/2$  kadar artırılarak, kaydırılmış sıcaklık değerleri ( $T^*$ ) bulunur (Çizelge 2.2).

3- Kaydırılmış bir sıcaklık aralığında, (2.3) eşitliği uygulanır (Linnhoff, ve Flower, 1978):

$$\Delta H_i = (\sum CP_c - \sum CP_h) \Delta T_i \quad (2.3)$$

Burada ,  $\Delta H_i$  = kaydırılmış i aralığında entalpi farkı

$\Delta T_i$  = kaydırılmış sıcaklık farkı

**Çizelge 2.2 Kaydırılmış akım sıcaklıkları**

Akım No	Akım Durumu	$T^*_s$ (K)	$T^*_T$ (K)
1	Sıcak	395	305
2	Sıcak	445	345
3	Soğuk	305	395
4	Soğuk	335	375

Soğuk akımların etkisi sıcak akımların etkisinden daha fazla ise,  $\Delta H$  pozitif olur ve ilgili aralıkta ısı eksikliğinin olduğunu gösterir. Sıcak akımların etkisi soğuk akımların etkisinden fazla ise,  $\Delta H$  negatif olur ve ilgili aralıkta ısı fazlalığının olduğunu gösterir (Şekil 2.7). Sistem içerisindeki ısı eksikliği, sıcak servis akımından veya daha yüksek bir sıcaklık aralığındaki enerjiden karşılanabilir. Fazla olan ısı aralıktan aralığa, sıcaklık skalası boyunca, aşağıya doğru kademeli olarak verilir (Şekil 2.8).

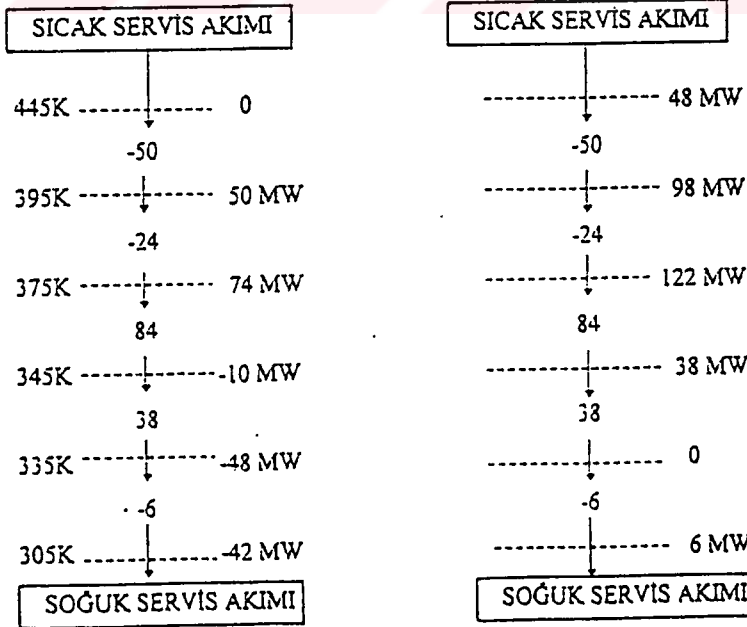
4- En yüksek sıcaklık değeri ile başlanarak, her bir aralıkta aktarılan toplam net ısı hesaplandıktan sonra (Şekil 2.7), her bir kaydırılmış sıcaklık değeri için, net ısı aktarımı hesaplanır. Negatif ise, bu, bir sonraki düşük ( $i + 1$ ) aralığına olası enerji aktarımını gösterir. Kademeyi sağlamak amacıyla, darboğazda ısı akışlarını sıfır yapmak gerekir. Bu nedenle, prosese, sıcak bir servis akımından yeterli miktarda ısı eklenmelidir. Sıcak servis akımından alınması gereken en az ısı miktarı, en geniş negatif ısı akışıdır. Buna göre, kademeli diyagramdan en geniş negatif ısı akışı miktarı, minimum sıcak servis akımı miktarını verir (Şekil 2.8) (Linnhoff ve Hindmarsh, 1983).

Şekil 2.8'deki ısı denklighinden,  $Q_{h,min} = 48 \text{ MW}$  ve  $Q_{c,min} = 6 \text{ MW}$  olarak görülür. Isı akışının sıfır olduğu nokta darboğaz noktasıdır. Burada darboğaz sıcaklığı,  $T_d = 335 \text{ K}$ 'dir.

Sıcak akımlar için darboğaz sıcaklığı  $T_{hd} = 340 \text{ K}$ ; soğuk akımlar için ise  $T_{cd} = 330 \text{ K}$ 'dir. Bu sonuçlar, bileşik eğrilerden elde edilen sonuçlarla uyum içinde olur.

Sıcaklık Aralıkları (K)	Akımlar	$\Delta T_{aralık}$ (K)	$\Sigma C_{p_c} - \Sigma C_{p_h}$ (MW/K)	$\Delta H_{aralık}$ (MW)
445 K	2	50	-1	-50
395 K	1	20	-1,2	-24
375 K		30	2,8	84
345 K		10	3,8	38
335 K	4	30	-0,2	-6
305 K	3			

Şekil 2.7 Kaydırılmış sıcaklık aralığında ısı denklighi



Şekil 2.8 Kademeli diyagram

## 2.4 Isı Geri Kazanımı Darboğazı

Darboğaz noktasının bulunması, problemin karmaşıklığını giderir ve mühendise, kendi kararlarını verme yetisini kazandırır. Bu özellik, endüstriyel uygulamalarda güvenli ve kontrol edilebilen, iyi düzenlenmiş tasarımların elde edilmesini sağlar. Yöntemin uygulanma aşamaları aşağıdaki gibidir:

- Enerji hedefleri tasarımdan önce belirlenir
- Proses, darboğazın üstünde ve altında ayrılır ve minimum enerji tüketimi olan ağların tasarımı yapılır.
- Kontrol sağlanır.

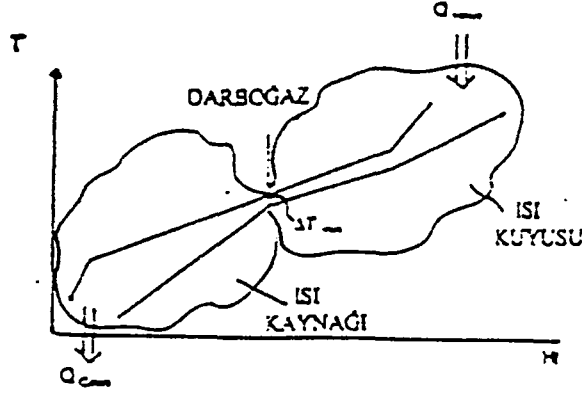
$\Delta T_{min}$ , normalde, sıcak ve soğuk bileşik eğriler arasında, *ısı geri kazanımı darboğazı* olarak adlandırılan tek bir noktada görülür.

Bileşik eğrilerdeki sermaye ve enerji arasındaki ilişki, tek tek ısı değiştiricilerin  $\Delta T_{min}$ 'dan daha küçük olmayan sıcaklık farklarına sahip olması gerektiğini düşündürür. Dolayısıyla, ısı değiştirici ağı hesaplamalarında bir başlangıç, ısı değiştiricilerin tek tek bileşik eğriler arasındaki  $\Delta T_{min}$ 'dan daha küçük bir sıcaklık farkına sahip olmadığını kabul etmektir. Bu kural akılda tutularak, Şekil 2.9'da gösterildiği gibi, proses, darboğazda ikiye bölünür (Smith, 1995).

Darboğaz, problemi, biri sıcak biri soğuk olmak üzere, iki ayrı bölgeye ayırır (Şekil 2.9). Sıcak uç, darboğaz sıcaklığından daha sıcak olan akımları kapsar. Bu bölgede, sadece servis akımı ısıtmasına ihtiyaç duyulur, servis akımı soğutması ihtiyacı yoktur. Soğuk uç, darboğaz sıcaklığından daha soğuk olan akımları kapsar. Bu bölgede, sadece servis akımı soğutmasına ihtiyaç duyulur, servis akımı ısıtması ihtiyacı yoktur. Bu durumda, her iki servis akımı ulaşılabilir minimum değerdedir. Darboğazdan geçen ısı aktarımı yoktur.

Proses, darboğazın üstünde (sıcaklık cinsinden), minimum sıcak servis akımı,  $Q_{h,min}$  ile, ısı dengededir. Servis akımından ısı alınır, ancak ona ısı verilmez. Proses, bir ısı kuyusu gibi davranır (Şekil 2.9). Proses, darboğazın altında (sıcaklık cinsinden) minimum soğuk servis

akımı,  $Q_{c,min}$  ile ısı dengededir. Servis akımına ısı verilir, ondan ısı alınmaz. Proses, bir ısı kaynağı gibi davranır (Smith ve Linnhoff, 1988).

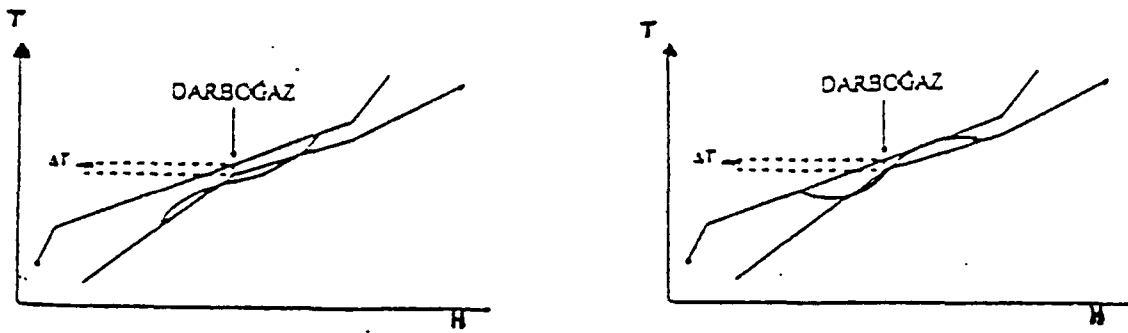


Şekil 2.9 Proses ısı kaynağı ve ısı kuyusu

Darboğazın üstünde, sıcak akımın darboğaz sıcaklığı ( $T_{h,d}$ ) ya da daha yüksek sıcaklıktaki sıcak akımlardan; darboğazın altında, soğuk akımın darboğaz sıcaklığı ( $T_{c,d}$ ) ya da daha düşük sıcaklıktaki soğuk akımlara ısı akışı (Şekil 2.10a) mümkündür. Ancak, darboğazın altında,  $T_{h,d}$  ya da daha düşük sıcaklıktaki akımlardan; darboğazın üstünde,  $T_{c,d}$  ya da daha yüksek sıcaklıktaki soğuk akımlara ısı akışı,  $\Delta T_{min}$  ihlal edilmeden, mümkün değildir (Şekil 2.10b).

(a)

(b)



Şekil 2.10 Darboğazın önemi

Darboğaz prensibi, eğer darboğazın altına herhangi bir ısı aktarımı varsa, akımın hedefi sağlayamayacağını söyler. Darboğazın üstündeki sistemden alt sisteme olan ısı aktarımı "XP" olarak ifade edilirse, darboğaz denklemi şöyledir (Linnhoff, 1993; Smith, 1993):

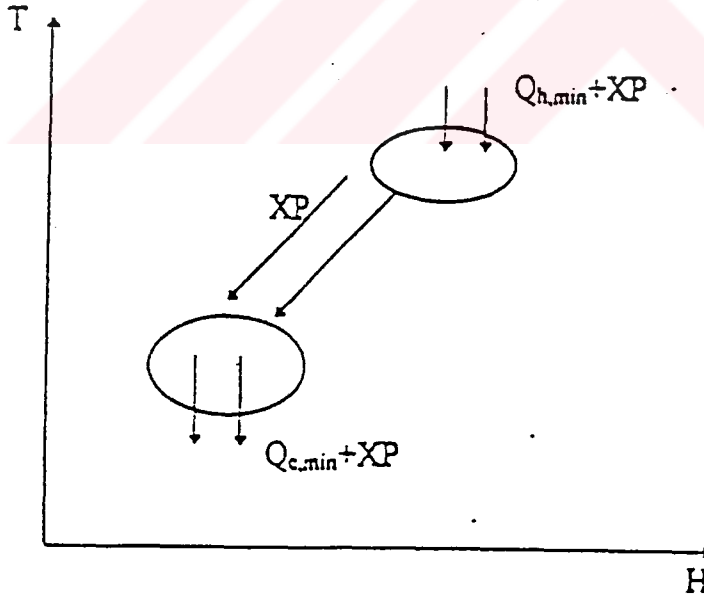
$$A = T + XP$$

(gerçek enerji tüketimi) = (hedef enerji tüketimi) + (darboğazdan ısı akışı)

$XP=0$  ise, gerçek ısı ihtiyacı hedef değerine eşit olur. Darboğaz prensibine göre, darboğazdan olan ısı aktarımı minimum yapılarak, ısı geri kazanımı seviyesi optimumda tutulabilir. Yani, bileşik eğrilerle belirlenmiş enerji hedefine ulaşmak için, tasarımcı, darboğazdan geçen ısı aktarımından kaçınmalıdır (Şekil 2.11).

Darboğazdan ısı aktarımına izin vermeyen bir tasarım, maksimum enerji geri kazanımı (MER\*) sağlar. Belli bir  $\Delta T_{\min}$  değeri için, bu durum, servis akımı yükleri minimize edilerek, sıcak akımların maksimum enerjisinin soğuk akımlara aktarılmasını, dolayısıyla geri kazanılmasını, beraberinde getirir. Böylece, bir ısı değiştirici ağının termodinamik organizasyonu için, aşağıdaki kurallara uyulmalıdır (Linnhoff ve Hindmarsh, 1983):

- Darboğazdan ısı aktarılmaz.
- Darboğazın üstünde soğuk servis akımı kullanılmaz.
- Darboğazın altında sıcak servis akımı kullanılmaz.



Şekil 2.11 Darboğazda prosesden prosese ısı aktarımı

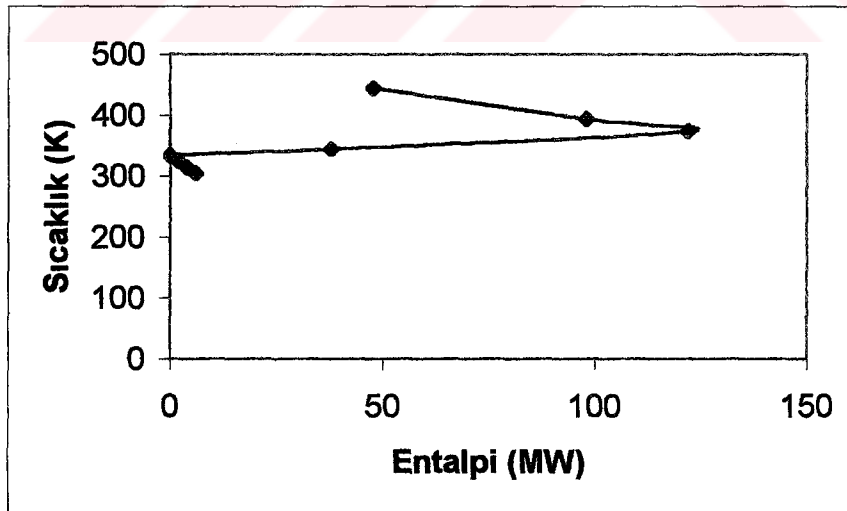
\* MER : İngilizcede *Maximum Energy Recovery* kelime grubunun kısaltılmış şekli.

Hedefe ulaşmak için, bu kurallar, hiç bir ısı değiştiricidedeki sıcaklık farkının  $\Delta T_{min}$ 'dan küçük olmaması ön şartı ile, gerekli ve yeterlidir.

## 2.5 Büyük Bileşik Eğri

Bir başka darboğaz analizi aracı olan büyük bileşik eğri, enerji geri kazanımı miktarı ile sıcak ve soğuk servis akımının yüklerini gösterir. Yani tasarımcıya, her bir sıcaklık için toplam enerji eksikliği veya fazlalığını gösterir; ayrıca, en uygun servis akımını veya servis akımı karışımını seçmesinde yardım eder.

**Büyük bileşik eğri**, hesaplanan ısı aktarım değerleri kullanılarak oluşturulur (Şekil 2.12). Büyük bileşik eğrinin çizimi için, bileşik eğriler dikey olarak bir araya getirilir ve sonra aralarındaki yatay uzaklık okunur. Darboğazda net ısı akışı sıfır olduğundan, büyük bileşik eğrinin sıcaklık eksenine temas ettiği nokta, darboğaz noktasıdır. Büyük bileşik eğri ile sıcaklık eksenini arasında kalan üst kısımdaki yatay uzaklık minimum ısıtma ihtiyacını ( $Q_{h,min}$ ), alt kısımdaki yatay uzaklık ise minimum soğutma ihtiyacını ( $Q_{c,min}$ ) gösterir. Çizelge 2.1'de verilen akım verilerinden oluşturulan büyük bileşik eğri aşağıda gösterilmiştir (Şekil 2.12).



Şekil 2.12 Büyük bileşik eğri

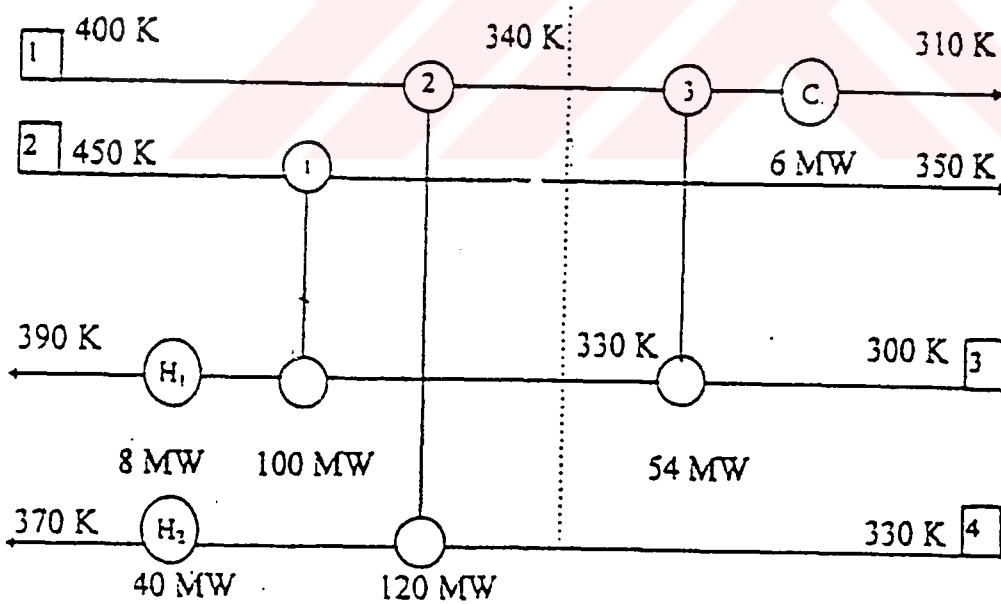


## 2.6 Ağ Diyagramı

Ağ diyagramı, servis akımlarının ve darboğazın birlikte gösterilebildiği bir gösterim şeklidir. Bu gösterimin avantajı, akım sistemini yeniden çizmeksizin ısı aktarım eşlenmelerinin, darboğazın, ısıtıcıların ve soğutucuların birarada gösterilebilmesidir. Ayrıca, ağ diyagramı, ısı değiştiricinin karşıt akışlı olma özelliğini gösterir ve sıcaklık olabirliği kolayca kontrol edilebilir. Darboğaz, akış şeması üzerinde gösterilemediği halde, ağ diyagramı üzerinde gösterilebilir.

Ağ diyagramında, sıcak akımlar üstte toplanır ve soldan sağa besleme sıcaklığından hedef sıcaklığına doğru yatay çizgiler olarak gösterilir (Şekil 2.13). Soğuk akımlar ise altta ve ters yöne doğru gösterilir. Darboğaz ayrılması, akım verilerine uygun aralıktadır; yani, sıcak akımlar  $T_d + \Delta T_{\min}/2$ 'de, soğuk akımlar ise  $T_d - \Delta T_{\min}/2$ 'de gösterilir.

Proses ısı değiştiricileri, eşlenmiş akımlar üzerinde çizilen daireler ve onları birleştiren dikey çizgiler ile gösterilir. Isıtıcılar (H) soğuk akımlar, soğutucular (C) ise sıcak akımlar üzerindeki dairelerle gösterilir.



Şekil 2.13 Ağ diyagramı

Ağ diyagramında gösterilen birimlerin verileri, aşağıdaki çizelgede verilmektedir.

**Çizelge 2.3** Darboğaz üstündeki ısı değiştiricilerin verileri

Isı Değiştirici No	Akım No (Soğuk)	Akım No (Sıcak)	Isı (MW)	$T_{hi}$ (K)	$T_{ho}$ (K)	$T_{ci}$ (K)	$T_{co}$ (K)
1	3	2	100	450	350	330	385,6
2	4	1	120	400	340	330	360

**Çizelge 2.4** Isıtıcıların verileri

Isıtıcı	Akım No (Soğuk)	Isı (MW)	$T_{ci}$ (K)	$T_{co}$ (K)	$CP_c$ (MW/K)
H1	3	8	385,6	390	1,8
H2	4	40	360	370	4

**Çizelge 2.5** Darboğaz altındaki ısı değiştiricinin verileri

Isı Değiştirici No	Akım No (Soğuk)	Akım No (Sıcak)	Isı (MW)	$T_{hi}$ (K)	$T_{ho}$ (K)	$T_{ci}$ (K)	$T_{co}$ (K)
3	3	1	54	340	313	300	330

**Çizelge 2.6** Soğutucunun verileri

Soğutucu	Akım No (Sıcak)	Isı (MW)	$T_{hi}$ (K)	$T_{ho}$ (K)	$CP_h$ (MW/K)
C	1	6	313	310	2

## 2.7 Darboğaz Tasarım Yöntemi

Darboğaz tasarım yöntemi ile;

- Darboğaz bölünmesi tanınır,
- Tasarıma darboğazda başlanır ve tasarım iki ayrı problem haline getirilir.

Darboğaz tasarım yöntemi, iki temel ve önemli özelliği birleştirir. Birincisi, darboğazın sıcaklık bakımından en fazla kısıtlanmış bölge olduğunu kabul eder; buna bağlı olarak da tasarıma darboğazda başlanır. İkincisi, tasarımcıya seçenekler arasında seçim yapma olanağını sağlar (Linnhoff ve Hindmarsh, 1983).

### 2.7.1 Darboğazda olabilirlik kriterleri

Darboğazdaki önemli eşlenmelerin, tasarım seçeneklerinin ve akımları bölme ihtiyacının saptanması, akım verilerine, darboğazda üç olurluk kriterinin uygulanması ile yapılır. Bu olurluk kriterlerine *darboğaz eşlenmeleri* denir.

### 2.7.2 Akım bölünmesi (Proses akımları ve kollarının sayısı)

İlk olabilirlik kriteri, darboğazdaki akım sayısı ile ilgilidir. Sıcak ve soğuk akımlar, minimum servis akımı kullanımına uygun ısı değiştirici düzenini kabul edecek sayıda olmalıdır.

Bazı eşlenmelerde,  $\Delta T_{\min}$  kısıtı ihlal edilmeden bir sıcak akım ile bir soğuk akımın eşlenmesi mümkün olmaz. Böyle durumlarda, servis akımı soğutması ya da ısıtması gerekli olabilir; bu ise darboğazdaki orijinal akım verilerinin minimum servis akımı tasarımı ile uygun olmaması anlamındadır.

Bu uyumsuzluk meydana geldiği zaman, darboğazdaki akımların *akım bölünmesi* ile düzeltilmesi gerekir. Örneğin, eşlenemeyen soğuk bir akım bölündüğünde, fazladan bir soğuk kol oluşur ve uygun bir sıcak akım ile darboğazda eşlenir.

Özetle; darboğazda her sıcak akım için bir darboğaz eşlenmesi yapılabildiğinde, sıcak uçtaki akım sayısı minimum servis akımı tüketen tasarıma uygun olur. Bunun olabilmesi için darboğazın üstünde (2.4) eşitsizliği sağlanmalıdır:

$$N_H \leq N_C \quad (2.4)$$

Burada,  $N_H$  = sıcak akım ve/veya kollarının sayısı

$N_C$  = soğuk akım ve/veya kollarının sayısı

Bu eşitsizliğin tam uygulanabilmesi için akım bölünmesi gerekli olabilir.

Darboğazın altında, yine minimum servis akımı tüketen bir tasarıma ulaşmak amacıyla, her soğuk akım için bir darboğaz eşlenmesi gerekli olduğundan (2.5) eşitsizliği sağlanmalıdır:

$$N_H \geq N_C \quad (2.5)$$

Bu eşitsizliğin tam uygulanabilmesi için de akım bölünmesi gerekli olabilir (Linnhoff ve Hindmarsh, 1983).

### 2.7.3 Tasarıma darboğazdan başlama

Darboğaz, bir tasarımın en çok kısıtlanmış bölgesini oluşturur. Darboğazda, sıcak ve soğuk akımların toplamları arasında  $\Delta T_{\min}$  vardır. Sonuç olarak, bu bölgedeki eşlenmelerin sayısı çok kısıtlıdır. Burada, çok önemli bir eşlenme bulunur. Bu eşlenme yapılmazsa,  $\Delta T_{\min}$ 'dan daha küçük sıcaklık farklarının kullanımı ya da darboğazdan ısı aktarımının bir sonucu olarak, servis akımlarının aşırı kullanımı söz konusudur. Isı değiştiricilerin bileşik eğrileri arasında  $\Delta T_{\min}$ 'dan daha küçük bir sıcaklık farkı olmamalıdır. Başlangıç için, ısı değiştiricilerdeki sıcaklık farkının  $\Delta T_{\min}$ 'dan küçük olması kısıtı kabul edilebilir. Tasarım darboğazdan uzakta başlatılmışsa (problemin sıcak veya soğuk ucunda) darboğaza yaklaştıkça, ilk eşlenmeleri,  $\Delta T_{\min}$  kısıtını veya darboğazı ihlal eden yeni eşlenmeler takip eder. Böylece, tasarım darboğazda başlatılırsa, ilk hesaplamalar problemin en kısıtlı bölümünde yapılmış olur (Smith, 1995).

#### 2.7.4 Bireysel eşlenmeler için CP eşitsizliği

Darboğazda  $\Delta T_{\min}$  ile başlanarak, darboğazdan uzaklaştıkça sıcaklık farklarının artması için aşağıdaki ilişkiler geçerlidir.

$$\text{darboğazın üstünde : } CP_h \leq CP_c \quad (2.6)$$

$$\text{darboğazın altında : } CP_h \geq CP_c \quad (2.7)$$

Daha genel bir kural ise aşağıda verilmiştir. Bu bağıntı sadece darboğazda, eşlenmenin her iki ucu darboğaz şartlarında olduğunda uygulanır. Bunun anlamı, söz konusu eşlenme için bir ısı değiştiricinin sıcak ya da soğuk ucunda olması gereken sıcaklık farkının yani  $\Delta T_{\min}$  kısıtının sağlanmış olmasıdır (Smith, 1995).

$$CP_{\text{çıkış}} \geq CP_{\text{giriş}} \quad (2.8)$$

#### 2.7.5 CP çizelgesi

Darboğaz bölgesindeki önemli eşlenmeler, bir CP çizelgesi kullanılarak açıklanabilir. Bu çizelgede, darboğazdaki sıcak ve soğuk akımların CP değerleri sıralanır.

Darboğazın üstünde, soğuk servis akımı kullanılmamalıdır. Sıcak akımlar, darboğaz sıcaklığına, ısı geri kazanımı ile soğutulmalıdır. Gerekirse, sıcak servis akımı darboğazın üstündeki soğuk akımların ısıtılmasında kullanılır. Darboğazın üstündeki soğuk akımlar sıcak bir akımla eşlendirilir. Sıcak akım darboğaz şartlarındaysa, eşlendirilecek soğuk akımın da darboğaz şartlarında olması gerekir; aksi halde  $\Delta T_{\min}$  sınırlaması ihlal edilir.

Benzer olarak, darboğazın altında, sıcak servis akımı kullanılmamalıdır. Soğuk akımlar, darboğaz sıcaklığına, ısı geri kazanımı ile ısıtılmalıdır. Gerekirse, soğuk servis akımı darboğazın altındaki sıcak akımların soğutulmasında kullanılır. Yine, sıcak akımlarla soğuk akımlar eşlendirilir. Soğuk akım darboğaz şartlarındaysa,  $\Delta T_{\min}$  sınırlamasının ihlal edilmemesi için, eşlendirilecek sıcak akımın da darboğaz şartlarında olması gerekir (Smith, 1995).

### 2.7.6 İşaretleme kuralı

Bir darboğaz topolojisi seçildikten sonra, sıcak ve soğuk uçların tasarımı, sermaye maliyetlerini minimumda tutmak üzere devam ettirilebilir; yani son tasarımlar, minimum birim sayısı için yönlendirilebilir. Bu çalışma, darboğaz ısı değiştiricilerindeki ısı yüklerini tanımlamak için bir *işaretleme kuralı* uygulanarak yapılır. Bu buluşsal kural, minimum birim sayısı hedefi eşitliğinden, doğrudan ortaya çıkmaktadır:

$$N_{hx,min} = N_h + N_c + N_{hu} + N_{cu} - 1 \quad (2.9)$$

Burada,  $N_{hx,min}$  = minimum birim sayısı

$N_h$  = sıcak akımların sayısı

$N_c$  = soğuk akımların sayısı

$N_{hu}$  = sıcak servis akımlarının sayısı

$N_{cu}$  = soğuk servis akımlarının sayısı

Her eşlenme ile, bir akım hedef sıcaklığına getirilir ya da servis akımını yok edilirse, denklem sağlanır. Bu durumda, eşlenmenin, akımı ya da servis akımını işaretlediği söylenir, yani akımın veya servis akımının kalan tasarım işinde daha fazla ele alınması gerekmez.

## 2.8 Tasarım Yönteminin Özeti

### 2.8.1 HEN tasarımı

Isı değiştirici ağlarının tasarımında, minimum ısı değiştirici sayısı,  $N_{hx,min}$ , önemlidir. Gerekli ısı değiştirici sayısı, bir maksimum enerji geri kazanım ağındaki ısı değiştirici sayısına eşit veya ondan küçük olduğundan, başlangıçta, darboğazda tanımlanmış bir  $\Delta T_{min}$  için maksimum enerji geri kazanımıyla karakterize edilen bir ısı değiştirici ağı geliştirmek ve sonra eğer gerekli ise ağı maliyeti açısından bu tasarımı iyileştirmek uygun olur.

### 2.8.2 MER tasarımı

Bir ısı değiştirici ağı tasarımı, maksimum enerji geri kazanımı için iki kısımda ele alınır. İlk önce darboğazın üstündeki akımlar için bir ağ ve sonra darboğazın altındaki akımlar için bir ağ tasarlanır. Her iki durumda da tasarıma darboğazdan başlanır ve oradan uzaklaşarak devam edilir. Bu yaklaşım, darboğazdan ısı aktarımının olmaması kısıtını sağlar. Darboğazın üstündeki ve altındaki akımların eşlenmeleri, bu akımların sıcaklıklarına ve ısı yüklerine bağlıdır. Optimum maliyetli ısı değiştirici ağı tasarımının elde edilmesi için aşağıdaki kurallar kullanılabilir (Bejan, Tsatsaronis ve Moran, 1996):

- Darboğazın üstünde soğuk servis akımı veya darboğazın altında sıcak servis akımı kullanılmaz.
- Çok büyük veya çok küçük sıcaklık farklarının (termodinamik itici kuvvetler) kullanılmasından kaçınılır.
- Sıcaklık, basınç veya kimyasal bileşimleri farklı olan akımların karıştırılması minimuma indirilir.
- Birinin çıkış sıcaklığı diğerinin giriş sıcaklığına yakın olan akımların eşlenmesine çalışılır.
- Isı kapasiteleri (CP) benzer olan akımların eşlenmesine çalışılır. Eğer sıcak ve soğuk akımın ısı kapasiteleri arasında önemli bir fark varsa, ısı kapasitesi daha büyük olan akım bölünür.
- Isı değiştiricilerin yükü maksimize edilir.
- Tüm ısı değiştiricilerin minimum sıcaklık farkı, darboğazda seçilen  $\Delta T_{\min}$ 'a eşit veya  $\Delta T_{\min}$ 'dan daha büyük olmalıdır. Bu koşulun sağlanması daha önce verilen (2.4), (2.5), (2.6) ve (2.7) eşitliklerine bağlıdır.

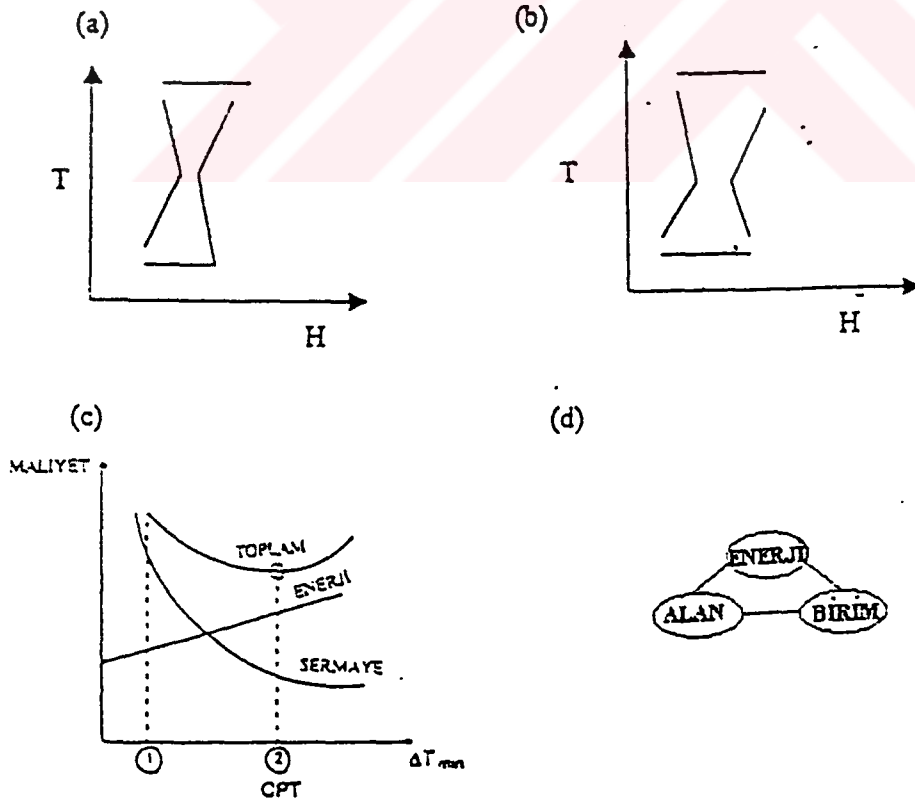
Eğer (2.4) eşitliği sağlanamıyorsa soğuk akım bölünmelidir. Darboğazın üstünde tüm akım eşlenmeleri için (2.6) eşitliği sağlanamıyorsa bir akım (normal olarak bir sıcak akım) bölünmelidir. (2.5) eşitliği sağlanamıyorsa sıcak akım bölünmelidir. Darboğazın altında tüm akım eşlenmeleri için (2.7) eşitliği sağlanmıyorsa bir akım (normal olarak bir soğuk akım) bölünmelidir. Bütün bu kurallara uyularak tasarım tamamlanır.

### 3. ISI DEĞİŞTİRİCİ AĞLARININ YATIRIM ve TOPLAM MALİYET HEDEFLERİ

#### 3.1 $\Delta T_{min}$ 'un Önemi

Isı değiştirici ağlarının temel bir özelliği, enerji maliyeti ile yatırım maliyeti arasındaki ilişkidir (Linnhoff ve Ahmad, 1990).

şekil 3.1a ve b'de,  $\Delta T_{min}$ 'un çeşitli değerleri için bileşik eğrilerin birbirlerine göre durumları değiştikçe, sistemin maliyetinin nasıl etkilendiği gösterilmiştir. Eğriler birbirlerine değdiğinde, prostedeki bir noktada ısı aktarımı için itici kuvvet yoktur ve bu, ( $\Delta T_{min} = 0$ ) sonsuz ısı aktarım alanı ve dolayısıyla sonsuz yatırım maliyeti anlamına gelir. Enerji hedefi (ve dolayısıyla eğriler arasındaki  $\Delta T_{min}$ ) yükseldikçe, yatırım maliyeti düşer. Bunun nedeni ise, artan sıcaklık farkı ile ısı aktarım alanının düşmesidir. Diğer yandan,  $\Delta T_{min}$  yükselirken enerji maliyeti yükselir. Dolayısıyla, enerji maliyeti ile yatırım maliyeti arasında bir ilişki vardır; yani enerji geri kazanımının ekonomik bir değeri (şekil 3.1c) vardır (Rudman, 1995; Smith, 1995).



şekil 3.1 Isı değiştirici ağlarında enerji – yatırım ilişkisi ve  $\Delta T_{min}$ 'un saptanması



$\Delta T_{\min}$  değıştikçe, ısı aktarım alanı, servis akımı ihtiyaçları ve ısı değiştirici sayısı değişir. Yatırım maliyeti, ısı değiştirici boyutlarından olduğu kadar, ağ yapısından da etkilenir. Böylece, ağdaki enerji tüketimi, toplam ısı değiştirici alanı ve birim sayısı arasında bir ilişki söz konusudur (şekil 3.1d) (Linnhoff ve Ahmad, 1990).

Herhangi bir  $\Delta T_{\min}$  için servis akımı ihtiyaçları ve yatırım maliyetleri kestirilebildiğinden, tasarımdan önce optimum  $\Delta T_{\min}$  saptanabilir. Optimum  $\Delta T_{\min}$ 'un anlamı, toplam maliyetin bir minimumdan geçmesidir (şekil 3.1c). Bu minimumu saptamak için doğrudan bir yol yoktur; ama yaklaşık değerini bulmak için bir yöntem vardır.

Bu yöntem, “maksimum enerji geri kazanımını gösteren tüm ağlar aynı yüzey alanına sahiptir ve bu alan, bileşik eğrilerden hesaplanan toplam minimum alana yaklaşık olarak eşitir” fikrine dayanır. Bu alan, tüm problem için bir ortalama ısı aktarım katsayısı kabul edilerek kestirilir. Bileşik eğriler basit karşıt akışlı kısımlara ayrılır ve herbirine genel ısı aktarım eşitliği ( $Q = U.A.\Delta T_{lm}$ ) uygulanarak, herbir bölüm için toplam alan bulunur. Bu şekilde hesaplanan alanların toplamı, toplam minimum alanı oluşturur. Bu alan gerekli birim sayısına göre değerlendirilerek, yaklaşık bir toplam ağ maliyeti elde edilir. Bundan sonra, yatırım maliyeti ile servis akımı arasındaki ilişkiye geçilir (Linnhoff ve Vredeveld, 1984; Linnhoff vd., 1994).

### 3.2 Minimum Isı Aktarım Alanı Hedefi

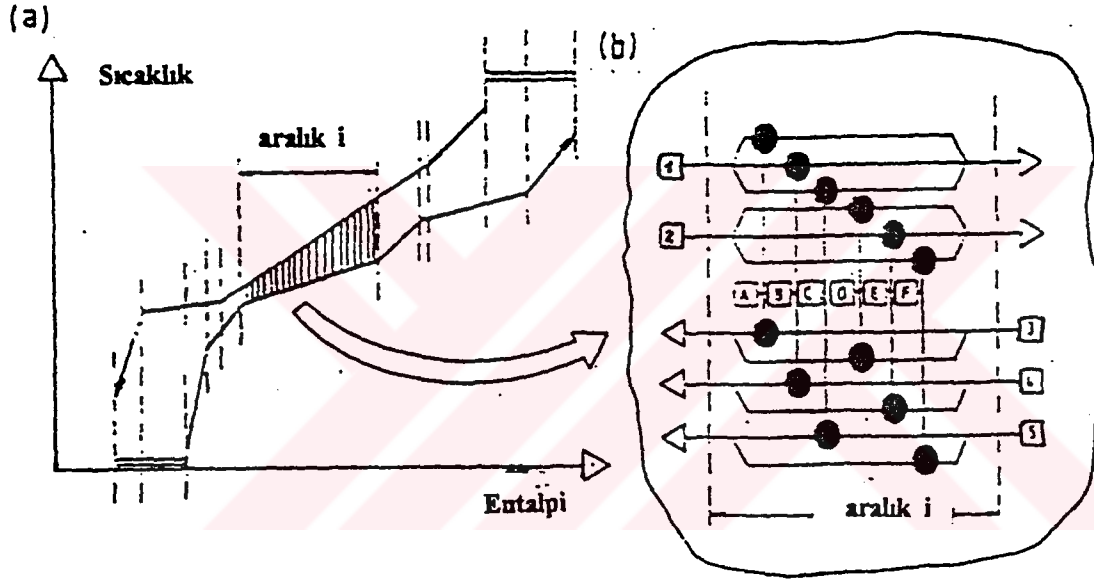
Bir ısı değiştirici ağının yatırım maliyetinin saptanmasında, *ısı aktarım alanı* önemli bir kriterdir. Darboğaz analizi yöntemindeki son gelişmeler sayesinde, ısı aktarım katsayıları ve diğer parametreler değerlendirilerek, bileşik eğrilerden ısı aktarım yüzeyi alanı hedefleri belirlenir. Yöntem, bileşik eğrilerin entalpi aralıklarına bölünmesini gerektirir. Her bir aralıkta, her akımın, bir akım yükü ( $q_i$ ) ve film aktarım katsayısı ( $h_i$ ) vardır. Bu durumda, minimum ısı aktarım alanı (Smith ve Linnhoff, 1988; Hall vd., 1990; Linnhoff ve Ahmad, 1990):

$$Alan_{\min} = \sum (1 / \Delta T_{lm, i}) \sum (q_i / h_i) \quad (3.1)$$

denklemleriyle verilir.

Başlangıç olarak, proses boyunca toplam ısı aktarım katsayısının ( $U$ ) sabit olduğu kabul edilir. Tüm ısı aktarımının gerçek karşıt akışlı olduğu ve  $U$ 'nun sabit olduğu kabulü ile, minimum toplam alan elde edilir.

Şekil 3.2'de, dikey ısı aktarımının garanti edilebileceği bir yol verilir. İlk önce, bileşik eğriler entalpi aralıklarına bölünür (Şekil 3.2a). Aralıklar, her bir bileşik profilde eğim değişikliğinin yer alması ile tanımlanır. Sonra, dikey ısı aktarımının kestiren her bir entalpi aralığı içinde bir ağ tasarımı düşünülür (Şekil 3.2b). Her bir sıcak akım, o aralıktaki soğuk akımların sayısına eşit sayıda kollara bölünür. Benzer olarak, her bir sıcak akım her bir soğuk akım ile eşlenir ve her eşlenme, entalpi aralığının köşe sıcaklığı arasında oluşur.



Şekil 3.2 Bileşik eğrilerde  $i$  entalpi aralığındaki ısı aktarımı

Her bir entalpi aralığında  $n_H$ ,  $n_C$  sayıda eşlenme yer alır. Burada,  $n_H$ , aralıktaki sıcak,  $n_C$  ise soğuk akımların sayısıdır. Genelde, her bir aralıktaki dikey ısı aktarımı için,  $n_H + n_C - 1$  sayıda minimum eşlenme gerekir.

Minimum toplam alan, tüm entalpi aralıklarındaki bu tür ısı değiştiricilerin alanlarının toplamı olarak elde edilebilir. Ancak,  $U$  sabit ise bu gerekli değildir. Bileşik eğrilerden,  $i$  aralığındaki dikey ısı aktarımı ile, alan, aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$A_i = \Delta H_i / U \Delta T_{lm,i} \quad (3.2)$$

Burada,  $\Delta H_i = i$  entalpi aralığının genişliği,

$\Delta T_{lm,i} = i$  aralığının logaritmik ortalama sıcaklık farkıdır.

Böylece, toplam minimum ağ alanı aşağıdaki hale gelir:

$$A_{min} = (1/U) \sum (\Delta H_i / \Delta T_{lm,i}) \quad (3.3)$$

### 3.2.1 Minimum alan modelinde farklı ısı aktarım katsayıları

Bu yöntem farklı  $U$  değerleri için geliştirilmiştir. Burada, Şekil.3.2'deki bileşik eğrilerin  $i$  entalpi aralığındaki dikey ısı aktarımı tasarımı yeniden ele alınsın. Isı aktarım katsayıları farklılaşır, bu ısı değiştiricilerin toplam alanı aşağıda, (3.4) eşitliği ile verilmektedir:

$$A_i = (1/\Delta T_{lm,i})(Q_{13}/U_{13} + Q_{14}/U_{14} + Q_{15}/U_{15} + Q_{23}/U_{23} + Q_{24}/U_{24} + Q_{25}/U_{25}) \quad (3.4)$$

Burada;  $Q_{13}$ , 1 ve 3 akımları arasındaki eşlenmenin yükü,  $U_{13}$  ise iki akımla ilgili toplam ısı aktarım katsayısıdır; diğerleri benzer şekilde ifade edilir.

$$1/U_{13} = 1/h_1 + 1/h_3$$

$$1/U_{14} = 1/h_1 + 1/h_4$$

$$1/U_{15} = 1/h_1 + 1/h_5$$

$$1/U_{23} = 1/h_2 + 1/h_3$$

$$1/U_{24} = 1/h_2 + 1/h_4$$

$$1/U_{25} = 1/h_2 + 1/h_5$$

(3.5)

Burada,  $h_1$ , 1 akımının ısı aktarım katsayısıdır (film, duvar ve kirlilik dirençleri dahil), diğerleri de benzerdir.

Böylece,

$$A_i = (1/\Delta T_{lm,i}) [ (1/h_1) (Q_{13} + Q_{14} + Q_{15}) + (1/h_2) (Q_{23} + Q_{24} + Q_{25}) + (1/h_3) (Q_{13} + Q_{23}) + (1/h_4) (Q_{14} + Q_{24}) + (1/h_5) (Q_{15} + Q_{25}) ] \quad (3.6)$$

Ancak,

$$\begin{aligned} Q_{13} + Q_{14} + Q_{15} &= (q_1)_i \\ Q_{23} + Q_{24} + Q_{25} &= (q_2)_i \\ Q_{13} + Q_{23} &= (q_3)_i \\ Q_{14} + Q_{24} &= (q_4)_i \\ Q_{15} + Q_{25} &= (q_5)_i \end{aligned} \quad (3.7)$$

Burada,  $(q_j)_i$ ,  $j$  akımının  $i$  entalpi aralığındaki entalpi değişimidir.

Böylece,

$$A_i = (1/\Delta T_{lm,i}) [(q_1)_i / h_1 + (q_2)_i / h_2 + (q_3)_i / h_3 + (q_4)_i / h_4 + (q_5)_i / h_5] \quad (3.8)$$

Alanların bileşik eğrilerdeki tüm aralıklar için toplanmasıyla; aşağıdaki temel formül elde edilir:

$$A_{min} = \Sigma (1 / \Delta T_{lm,i}) \Sigma (q_j / h_i) \quad (3.9)$$

Bu formül, akımların bireysel ısı aktarım katsayılarını kapsar ve bileşik eğrilerden minimum ısı değiştirici alanı için bir hedefin hesaplanmasına izin verir. Bu sonuç, daha önce, bir ispat ve açıklama getirilmeksizin Townsend ve Linnhoff (1984) tarafından verilmiştir. Ancak, ısı aktarım katsayıları arasında önemli ölçüde farklılık varsa, bu model minimum alanı hassas olarak kestiremez (Linnhoff ve Ahmad, 1990).

### 3.3 Isı Değiştirici Ağlarının Maliyet Analizi

Bir ısı değiştirici ağının maliyet analizi ile, toplam maliyetin yani yıllık ödemeler cinsinden ifade edilen yatırım ve enerji maliyetlerinin toplamının minimize edilmesi amaçlanır.

$$TM_{\text{yıllık}} = EM_{\text{yıllık}} + YM_{\text{yıllık}} \quad (3.10)$$

Burada,  $TM$  = toplam maliyet  
 $EM$  = enerji maliyeti  
 $YM$  = yatırım maliyeti

#### 3.3.1 Yatırım maliyeti

Bir ısı değiştirici ağının yatırım maliyeti, ısı aktarım alanı temelinde saptanır. Bu sebeple, bir ağın yatırım maliyetinin kestirilmesinde, öncelikle,  $A$  yüzey alanlı belli bir ısı değiştiricinin aşağıdaki basit ilişkiye göre maliyetlendirilebileceği kabul edilir (Hall, Ahmad ve Smith, 1990; Smith, 1995):

$$\text{Maliyet} = a + b \cdot (A)^c \quad (3.11)$$

Tipik olarak,  $a$  katsayısı kurma maliyetini,  $b$  katsayısı birim alan maliyetini,  $c$  katsayısı ise, güç faktörünü gösterir (SuperTarget paket programı kullanıcı kılavuzu, 1998).

Isı aktarım alanının maliyeti hedeflendiği zaman, hedeflenmiş alanın ağ değiştiricileri arasındaki dağılımı bilinmez. Bu sebeple, yukarıdaki eşitlik kullanılarak, ağ maliyetlendirmek için bazı alan dağılımları kabul edilmelidir; en basiti ise tüm ısı değiştiricilerin aynı alana sahip olmasıdır (Smith, R., 1995).

$$YM_{\text{ağ}} = N_b [a + b (A_{\text{ağ}} / N_b)^c] \quad (3.12)$$

Burada,  $YM_{\text{ağ}}$  = ağın yatırım maliyeti  
 $N_b$  = birim sayısı

$A_{ağ}$  = ısı değiştirici ağının toplam alanı

### 3.3.2 Faiz geri ödemelerini içermeyen yıllık maliyet

Faiz, borç alınan yatırımın kullanımını için ödenen bedel olarak tanımlanır ve tanımdan yola çıkarak ödenecek faiz miktarının artmasının maliyet açısından ekonomik olmayan sonuçlara götürebileceği görülür. Burada, yatırımı geri kazanma faktörü, ( $r_1$ ), yıllık faiz geri ödemelerini dahil etmez.

$$YM_{y\text{ıllık}} = YM_{k\text{uruluş}} \cdot r_1 \quad (3.13)$$

$$r_1 = (i+1)^N / N \quad (3.14)$$

Burada;  $N$  = ekonomik analiz için yıl sayısı (amortisman süresi)

$i$  = faiz oranı (indirim faktörü)

### 3.3.3 Faiz geri ödemelerini içeren yıllık maliyet

Yatırımı geri kazanma faktörü, ( $r_2$ ), yıllık faiz geri ödemelerini dahil eder.

$$YM_{y\text{ıllık}} = YM_{k\text{uruluş}} \cdot r_2 \quad (3.15)$$

$$r_2 = i \cdot (i+1)^N / [(i+1)^N - 1] \quad (3.16)$$

### 3.3.4 Enerji maliyetinin net bugünkü değeri

Yıllık ödeme bugünkü değer faktörü  $r_3$ 'ün etkisiyle yıllık enerji maliyetinin net bugünkü değeri hesaplanabilir. Amaç, enerji maliyetinin net bugünkü değerini minimize etmektir.

$$EM_{\text{bugün}} = EM_{y\text{ıllık}} \cdot r_3 \quad (3.17)$$

$$r_3 = [(i+1)^N - 1] / i \cdot (i+1)^N \quad (3.18)$$

Yıllık enerji maliyetinin net bugünkü değerinden toplam maliyetin bugünkü değerine geçilebilir.

$$TM_{\text{bugün}} = EM_{\text{bugün}} + YM_{\text{kuruluş}} \quad (3.19)$$

### 3.3.5 Geri ödeme süresi

Tasarımı yapılan ısı değiştirici ağının yatırım maliyetinin geri kazanılması için geçen süredir. Amaç ise bu sürenin mümkün olduğunca kısa olmasıdır.

$$\text{Ödeme süresi (yıl)} = YM_{\text{kuruluş}} / EM_{\text{yıllık}} \quad (3.20)$$



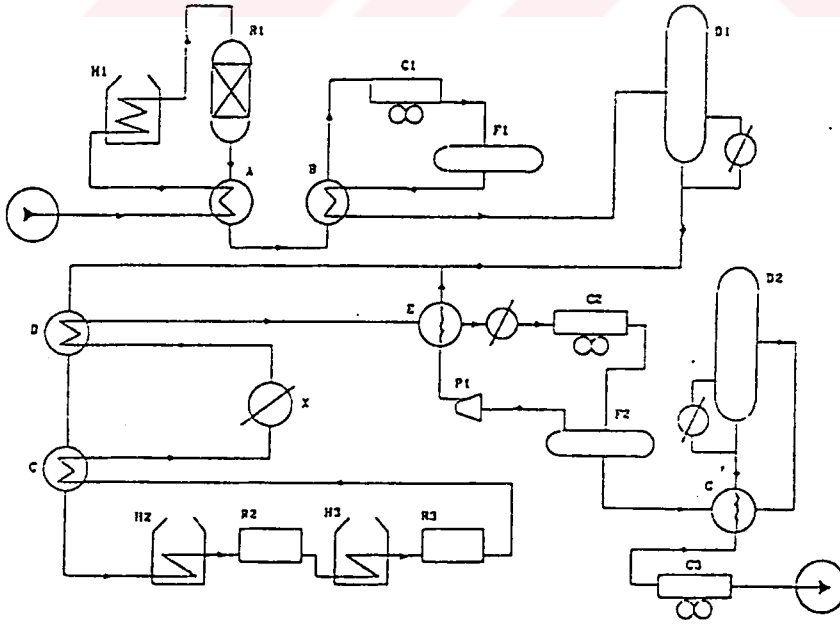
#### 4. UYGULAMALAR

Bu bölümde, belli sayıda akım içeren bir sistem için  $\Delta T_{\min}$  kısıtı değiştirildiğinde, bu değişimin enerji ve yatırım maliyetlerine, ısı değiştirici alanına ve toplam maliyete etkileri incelenmiştir. Bu hesaplamalarda, Linnhoff March Ltd tarafından hazırlanan SuperTarget paket programı kullanılmıştır.

SuperTarget, darboğaz analizinin uygulanması için oluşturulmuş bir paket programdır. Programın tipik kullanım amaçları, daha iyi proses tasarımları geliştirmek, yeni tasarım ve retrofit projeleri oluşturmak ve işletme maliyetini ve yatırım maliyetini minimize etmektir.

Bu program üç kısımdan oluşur. Birinci kısım, PROCESS adı altında hedefleme, ağ tasarımı ve simulasyon yapmaktadır. İkinci kısım, COLUMN adı altında destilasyon kolonunda ısı dağılımı ve fiziksel ayırma, üçüncü kısım ise SITE adı altında ısı ve güç hedeflemesi yapmaktadır.

Dört sıcak akım ve beş soğuk akım içeren bir sistemin kaynaklarda alınan (Linnhoff ve Ahmad, 1990) akım ve maliyet verileri aşağıda verilmiştir. Burada verileri kullanılan aromatik tesisin akış şeması Şekil 4.1'de verilmiştir.



Şekil 4.1 Aromatik tesisin akış şeması



Çizelge 4.1 Proses akım verileri

No	Akım	T <sub>s</sub> (°C)	T <sub>r</sub> (°C)	ΔH (MW)	CP (MW/°C)	h (MW/m <sup>2</sup> °C)
1	Sıcak 1	327	40	28,7	0,10	5.10 <sup>-4</sup>
2	Sıcak 2	220	160	9,60	0,16	4.10 <sup>-4</sup>
3	Sıcak 3	220	60	9,60	0,06	1,4.10 <sup>-4</sup>
4	Sıcak 4	160	45	46	0,40	3.10 <sup>-4</sup>
5	Soğuk 1	100	300	20	0,10	3,5.10 <sup>-4</sup>
6	Soğuk 2	35	164	9,03	0,07	7.10 <sup>-4</sup>
7	Soğuk 3	85	138	8,5	0,35	5.10 <sup>-4</sup>
8	Soğuk 4	60	170	6,60	0,06	1,4.10 <sup>-4</sup>
9	Soğuk 5	140	300	32	0,20	6.10 <sup>-4</sup>

Çizelge 4.2 Servis akımı verileri

No	Akım	T <sub>s</sub> (°C)	T <sub>r</sub> (°C)	h (MW/m <sup>2</sup> °C)	Maliyet (\$/MW yıl)
Y	Sıcak Yağ	330	230	0,00100	100000
S	Soğutma Suyu	10	30	0,00250	10000

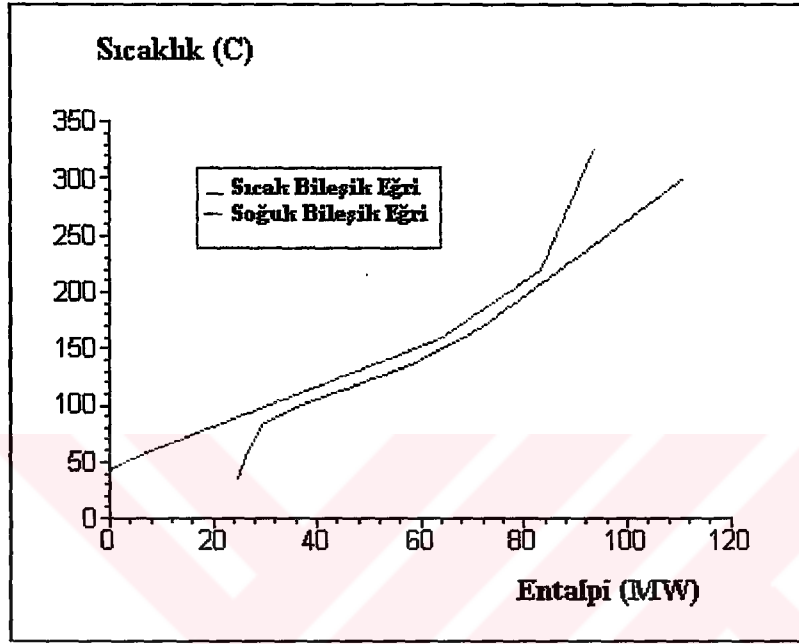
Çizelge 4.3 Maliyet verileri

Ekonomik Yöntem	Maliyet Bağıntısı	Katsayılar			Geri Ödeme Süresi (yıl)
		a	b	c	
Faiz Geri Ödemelerini İçermeyen Yıllık Maliyet	a + b (A) <sup>c</sup>	10000	350	1	3

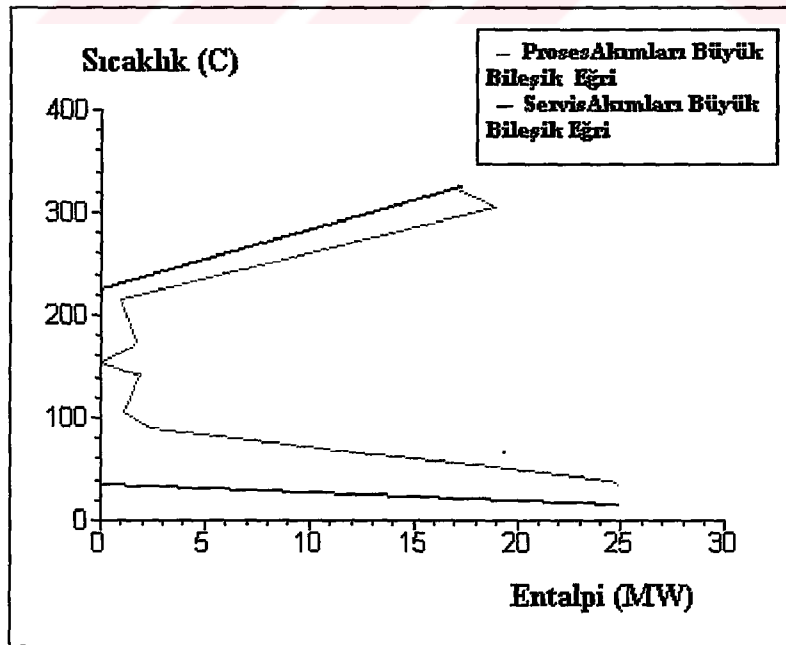
ΔT<sub>min</sub>'a 5 ile 30°C arasında değerler verilerek, bu akım verileri için tasarım hesaplamaları yapılmıştır. Ayrıntılı hesaplama örnekleri, 10 ve 26°C için verilmiştir. Diğer ΔT<sub>min</sub>

değerleri için, çizelge halinde sadece hesaplama sonuçları gösterilmiştir. Ayrıca,  $\Delta T_{\min}=10^{\circ}\text{C}$  için SuperTarget paket programının orijinal çıktılarının bazıları ekler bölümünde verilmiştir.

$\Delta T_{\min}=10^{\circ}\text{C}$  için bileşik eğriler Şekil 4.2'de, büyük bileşik eğriler Şekil 4.3'de gösterilmiştir.



Şekil 4.2  $\Delta T_{\min}=10^{\circ}\text{C}$  için bileşik eğriler



Şekil 4.3  $\Delta T_{\min}=10^{\circ}\text{C}$  için büyük bileşik eğriler

Şekil 4.2 ve 4.3'den minimum enerji ihtiyaçları  $Q_{h,min} = 17.3$  MW ve  $Q_{c,min} = 25$  MW olarak bulunmuştur.

Darboğazın üstünde:  $CP_h \leq CP_c$

Darboğazın altında:  $CP_h \geq CP_c$

Yukarıda verilen CP eşitsizlikleri kullanılarak, darboğazın üstündeki (Çizelge 4.4) ve altındaki (Çizelge 4.5) olası eşlenmeler saptanmıştır.

**Çizelge 4.4** Darboğazın üstünde eşlenme olurluğu ( $\Delta T_{min}=10^\circ\text{C}$ )

Akım	Sıcak 1	Sıcak 2	Sıcak 3	Sıcak 4
Soğuk 1	Evet	Hayır	Evet	–
Soğuk 2	Hayır	Hayır	Evet	–
Soğuk 3	–	–	–	–
Soğuk 4	Hayır	Hayır	Evet	Evet
Soğuk 5	Evet	Evet	Evet	–

**Çizelge 4.5** Darboğazın altında eşlenme olurluğu ( $\Delta T_{min}=10^\circ\text{C}$ )

Akım	Sıcak 1	Sıcak 2	Sıcak 3	Sıcak 4
Soğuk 1	Evet	–	Hayır	Evet
Soğuk 2	Evet	–	Hayır	Evet
Soğuk 3	Hayır	–	Hayır	Evet
Soğuk 4	Evet	–	Evet	Evet
Soğuk 5	Hayır	–	Hayır	Evet

Olabilir eşlenmeler ve  $\Delta T_{min}$  kısıtı gözönünde tutularak, Çizelge 4.6 ve Çizelge 4.7'de verilen eşlenmeler yapılmıştır. Çizelge 4.6 ve Çizelge 4.7'de gösterilen sıcaklık değerlerinden üsttekiler, sıcak akımın, alttakiler ise soğuk akımın sıcaklık değerleridir.

Ayrıca, soğuk servis akımı S, sıcak servis akımı Y şeklinde gösterilmiştir. Bu eşlenmeler, ayrıca ağ diyagramında gösterilmiştir (Şekil 4.4).

**Çizelge 4.6 Darboğazın altındaki eşlenmeler ( $\Delta T_{\min}=10^{\circ}\text{C}$ )**

Isı Değiştirici No	Eşlenen Akım No	Isı yükü (MW)	$T_i$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	$T_o$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	Alan ( $\text{m}^2$ )	$\Delta T_{\min}$ ( $^{\circ}\text{C}$ )
E1	3-8	5,40	160,0	70,0	7714,3	10,0
			60,0	150,0		
E2	4 <sub>A</sub> -9	2,00	159,9	152,9	883,9	9,9
			140,0	150,0		
E3	1-5	5,00	160,0	110,0	2428,6	10,0
			100,0	150,0		
E4	4 <sub>B</sub> -6	8,01	160,0	88,5	1480,7	10,0
			35,6	150,0		
E5	4 <sub>A</sub> -7	18,50	152,9	88,5	12566,4	3,5
			85,0	138,0		
E6	1-S	7,00	110,0	40,0	299,1	30,0
			10,0	15,6		
E7	3-S	0,60	70,0	60,0	129,2	30,5
			29,5	30,0		
E8	4-S	17,40	88,5	45,0	1528,9	29,4
			15,6	29,5		

**Çizelge 4.7 Darboğazın üstündeki eşlenmeler ( $\Delta T_{\min}=10^{\circ}\text{C}$ )**

Isı Değiştirici No	Eşlenen Akım No	Isı Yükü (MW)	$T_i$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	$T_o$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	Alan ( $\text{m}^2$ )	$\Delta T_{\min}$ ( $^{\circ}\text{C}$ )
E9	1-5	15,0	310,0	160,0	7285,7	10,0
			150,0	300,0		

**Çizelge 4.7 (devam)**

<b>E10</b>	2-9 <sub>A</sub>	9,6	219,8	160,0	3255,3	10,0
			150,0	205,0		
<b>E11</b>	3-8	1,2	180,0	160,0	1714,3	10,0
			150,0	170,0		
<b>E12</b>	3-6	1,0	196,3	180,0	269,6	30,0
			150,0	164,0		
<b>E13</b>	3-9 <sub>B</sub>	1,4	220,0	196,3	452,5	15,0
			150,4	205,0		
<b>E14</b>	1-9	1,7	327,0	310,0	57,1	105,0
			205,0	213,5		
<b>E15</b>	Y-9	17,3	330,0	230,0	2036,9	16,5
			213,5	299,9		

Tasarımın  $\Delta T_{\min}=10^{\circ}\text{C}$  için hesaplanan enerji maliyeti, yatırım maliyeti ve toplam maliyet değerleri, sırasıyla, Çizelge 4.8, Çizelge 4.9 ve Çizelge 4.10'da verilmiştir.

**Çizelge 4.8  $\Delta T_{\min}=10^{\circ}\text{C}$  için enerji maliyeti**

Servis Akımı	$T_s$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	$T_T$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	Isı Yüğü (MW)	Maliyet (\$ / yıl)
Sıcak Yağ	330	230	17.3	$1,73 \cdot 10^6$
Soğutma Suyu	10	30	25.0	$2,5 \cdot 10^5$

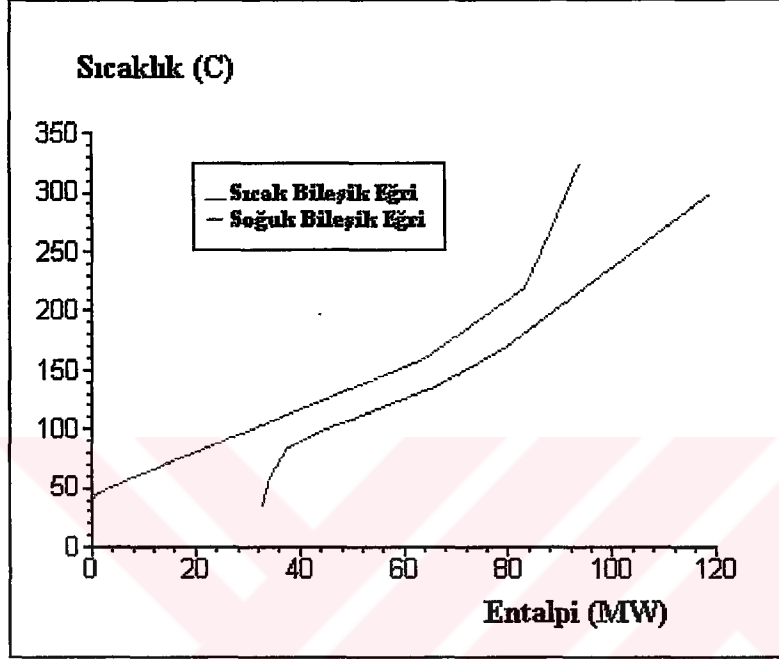
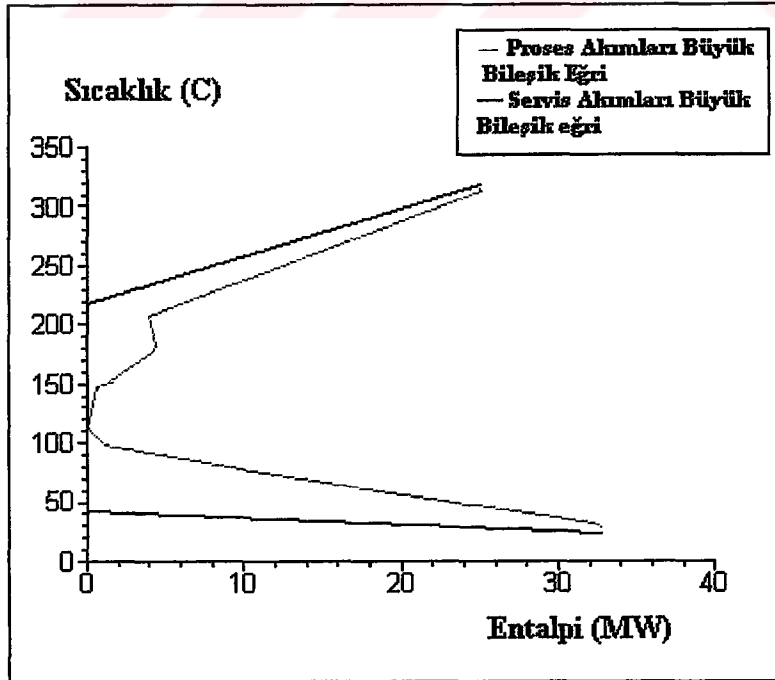
**Çizelge 4.9  $\Delta T_{\min}=10^{\circ}\text{C}$  için yatırım maliyeti**

	Darboğazın Üstünde	Darboğazın Altında	Toplam
Alan ( $\text{m}^2$ )	15071.44	27031.10	42102.54
Birim Sayısı	7	8	15
Maliyet (\$ / yıl)			$3,74 \cdot 10^6$



Çizelge 4.10  $\Delta T_{\min}=10^{\circ}\text{C}$  için toplam maliyet

Enerji Maliyeti (\$/yıl)	Yatırım Maliyeti (\$/yıl)	Toplam Maliyet (\$/yıl)
$1,98.10^6$	$3,74.10^6$	$5,72.10^6$

Şekil 4.5  $\Delta T_{\min}=26^{\circ}\text{C}$  için bileşik eğrilerŞekil 4.6  $\Delta T_{\min}=26^{\circ}\text{C}$  için büyük bileşik eğriler

$\Delta T_{\min} = 26^{\circ}\text{C}$  için Şekil 4.5’de bileşik eğriler ve Şekil 4.6’de büyük bileşik eğriler verilmiştir. Bu eğrilerden, minimum sıcak servis akımı ve soğuk servis akımı yükleri sırasıyla, 25 MW ve 32,8 MW olarak bulunmuştur.

CP eşitsizlikleri kullanılarak darboğazın üstünde ve altında saptanan olası eşleşmeler aşağıdaki gibidir.

**Çizelge 4.11 Darboğazın üstünde eşleşme olurluğu ( $\Delta T_{\min}=26^{\circ}\text{C}$ )**

Akım	Sıcak 1	Sıcak 2	Sıcak 3	Sıcak 4
Soğuk 1	Evet	Hayır	Evet	Hayır
Soğuk 2	Hayır	Hayır	Evet	Hayır
Soğuk 3	Evet	Evet	Evet	Hayır
Soğuk 4	Hayır	Hayır	Evet	Hayır
Soğuk 5	Evet	Hayır	Evet	Hayır

**Çizelge 4.12 Darboğazın altında eşleşme olurluğu ( $\Delta T_{\min}=26^{\circ}\text{C}$ )**

Akım	Sıcak 1	Sıcak 2	Sıcak 3	Sıcak 4
Soğuk 1	–	–	–	–
Soğuk 2	Evet	–	Hayır	Evet
Soğuk 3	Hayır	–	Hayır	Evet
Soğuk 4	Evet	–	Evet	Evet
Soğuk 5	–	–	–	–

CP eşitsizlikleri ve  $\Delta T_{\min}$  kısıtı gözönünde tutularak yapılan eşleşmeler Çizelge 4.13 ve Çizelge 4.14’de verilmiştir. Bu eşleşmelerin olduğu ağ diyagramı ise Şekil 4.7’de gösterilmiştir.

Çizelge 4.13 ve Çizelge 4.14’deki üsteki sıcaklık değerleri sıcak akımların, alttaki sıcaklık değerleri ise soğuk akımların sıcaklıklarıdır. Çizelgelerde sıcak servis akımı Y, soğuk servis akımı S olarak gösterilmiştir.



	1-9	4,4	521,0	202,0	119,7	222,3
			180,8	202,9		
<b>E6</b>	3-6	4,5	200,7	126,0	1237,6	26,0
			100,0	164,0		
<b>E7</b>	2-7	1,4	169,0	160,3	220,6	26,3
			134,0	138,0		
<b>E8</b>	3-8	1,2	220,0	200,7	229,1	72,3
			128,3	147,7		
<b>E9</b>	Y-5	4,3	330,0	312,8	399,7	30,0
			256,9	300,0		
<b>E10</b>	Y-8	1,3	235,2	230,0	143,5	65,9
			147,7	169,3		
<b>E11</b>	Y-9	19,4	312,8	235,2	2459,9	12,8
			202,9	300,0		



**Çizelge 4.14 Darboğazın altındaki eşlenmeler ( $\Delta T_{\min}=26^{\circ}\text{C}$ )**

Isı Değiştirici No	Eşlenen Akım No	Isı Yüğü (MW)	$T_i$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	$T_o$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	Alan ( $\text{m}^2$ )	$\Delta T_{\min}$ ( $^{\circ}\text{C}$ )
<b>E12</b>	1-6	4,6	126,0	80,5	447,7	26,0
			35,0	100,0		
<b>E13</b>	3-8	2,4	126,0	86,0	1318,7	26,0
			60,0	100,0		
<b>E14</b>	4-7	5,3	126,0	112,9	1039,9	26,0
			85,0	100,0		
<b>E15</b>	1-S	4,1	80,5	40,0	209,3	30,0
			10,0	12,5		
<b>E16</b>	3-S	1,7	86,0	60,0	198,9	47,5
			12,5	13,4		
<b>E17</b>	4-S	27,1	112,9	45,0	1906,6	31,6
			13,4	30,0		

$\Delta T_{\min}=26^{\circ}\text{C}$  için yapılan tasarımın enerji maliyeti, yatırım maliyeti ve toplam maliyet raporu sırasıyla, Çizelge 4.15, Çizelge 4.16 ve Çizelge 4.17'de verilmiştir.

**Çizelge 4.15  $\Delta T_{\min}=26^{\circ}\text{C}$  için enerji maliyeti**

Servis Akımı	$T_s$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	$T_T$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	Isı Yüğü (MW)	Maliyet (\$/yıl)
<b>Sıcak Yağ</b>	330	230	25,0	$2,5 \cdot 10^6$
<b>Soğutma Suyu</b>	10	30	32,8	$3,3 \cdot 10^5$



**Çizelge 4.16**  $\Delta T_{\min}=26^{\circ}\text{C}$  için yatırım maliyeti

	<b>Darboğazın Üstünde</b>	<b>Darboğazın Altında</b>	<b>Toplam</b>
<b>Alan (m<sup>2</sup>)</b>	11829,6	5121,1	16950,7
<b>Birim Sayısı</b>	11	6	17
<b>Maliyet (\$/yıl)</b>			1,87.10 <sup>6</sup>

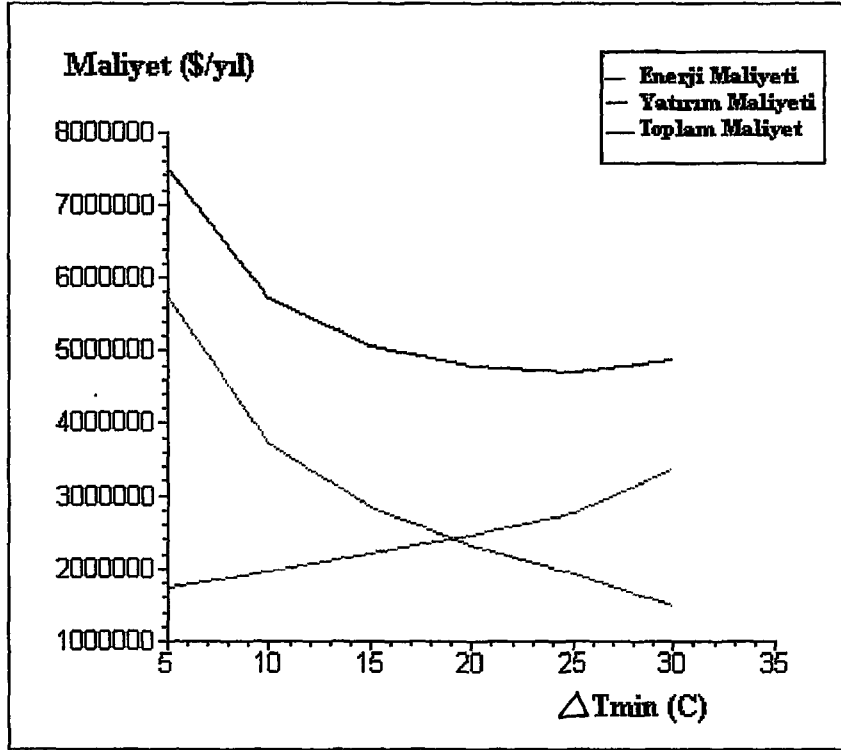
**Çizelge 4.17**  $\Delta T_{\min}=26^{\circ}\text{C}$  için toplam maliyet

<b>Enerji Maliyeti (\$/yıl)</b>	<b>Yatırım Maliyeti (\$/yıl)</b>	<b>Toplam Maliyet (\$/yıl)</b>
2,83.10 <sup>6</sup>	1,87.10 <sup>6</sup>	4,70.10 <sup>6</sup>

Çizelge 4.18'de 5°C ve 30°C arasında seçilen  $\Delta T_{\min}$  değerleri için sonuçlar gösterilmiştir. Bu sonuçlara göre oluşturulan toplam maliyet grafiği Şekil 4.8'de gösterilmiştir.

**Çizelge 4.18** Tasarım çizelgesi

$\Delta T_{\min}$ (°C)	$Q_{h,\min}$ (MW)	$Q_{c,\min}$ (MW)	Alan (m <sup>2</sup> )	Birim Sayısı	Enerji Maliyeti (\$/yıl)	Yatırım Maliyeti (\$/yıl)	Toplam Maliyet (\$/yıl)
<b>5</b>	15,1	22,9	48866,13	15	1,74.10 <sup>6</sup>	5,75.10 <sup>6</sup>	7,49.10 <sup>6</sup>
<b>10</b>	17,3	25,0	42102,54	15	1,98.10 <sup>6</sup>	3,74.10 <sup>6</sup>	5,72.10 <sup>6</sup>
<b>15</b>	19,4	27,1	24064,99	15	2,21.10 <sup>6</sup>	2,86.10 <sup>6</sup>	5,07.10 <sup>6</sup>
<b>20</b>	21,7	29,4	19564,22	15	2,46.10 <sup>6</sup>	2,33.10 <sup>6</sup>	4,79.10 <sup>6</sup>
<b>25</b>	24,5	32,2	16131,49	15	2,77.10 <sup>6</sup>	1,93.10 <sup>6</sup>	4,70.10 <sup>6</sup>
<b>30</b>	27,3	35,0	12409,44	15	3,38.10 <sup>6</sup>	1,50.10 <sup>6</sup>	4,87.10 <sup>6</sup>



Şekil 4.8  $\Delta T_{min}$  – maliyet grafiği

Çizelge 4.18 ve Şekil 4.8'den görülebileceği gibi bu akım verileri için toplam maliyetin minimum olduğu değer, yani  $\Delta T_{min}$ 'un optimum olduğu değer  $\Delta T_{min} = 26 \text{ }^\circ\text{C}$ 'dir.

Aynı akım verileri ve  $\Delta T_{min} = 10 \text{ }^\circ\text{C}$  ve  $\Delta T_{min} = 26 \text{ }^\circ\text{C}$  değerleri için ekonomik yöntem, faiz yüzdesi ve geri ödeme süreleri değiştirildiğinde, yatırım maliyetinin ve buna bağlı olarak da toplam maliyetin değiştiği görülmüştür. Ağ diyagramı ve yapılan eşlenmeler için bir değişiklik olmamıştır.

$\Delta T_{min} = 10 \text{ }^\circ\text{C}$  için faiz geri ödemelerini içermeyen yıllık maliyet yöntemi seçildiğinde, farklı geri ödeme süreleri için bulunan maliyet değerleri Çizelge 4.19'da verilmiştir.

**Çizelge 4.19** Faiz geri ödemelerini içermeyen yıllık maliyet yöntemi için maliyet değerleri  
( $\Delta T_{\min}=10\text{ }^{\circ}\text{C}$ )

<b>Geri Ödeme Süresi (yıl)</b>	<b>Enerji Maliyeti (\$/yıl)</b>	<b>Yatırım Maliyeti (\$/yıl)</b>	<b>Toplam Maliyet (\$/yıl)</b>
1	$1,98.10^6$	$1,12.10^7$	$1,32.10^7$
2	$1,98.10^6$	$5,61.10^6$	$7,59.10^6$
3	$1,98.10^6$	$3,74.10^6$	$5,72.10^6$
4	$1,98.10^6$	$2,81.10^6$	$4,78.10^6$
5	$1,98.10^6$	$2,24.10^6$	$4,22.10^6$

$\Delta T_{\min}=26\text{ }^{\circ}\text{C}$  değeri için aynı ekonomik yöntem seçildiğinde bulunan maliyet değerleri Çizelge 4.20'de verilmiştir.

**Çizelge 4.20** Faiz geri ödemelerini içermeyen yıllık maliyet yöntemi için maliyet değerleri  
( $\Delta T_{\min}=26\text{ }^{\circ}\text{C}$ )

<b>Geri Ödeme Süresi (yıl)</b>	<b>Enerji Maliyeti (\$/yıl)</b>	<b>Yatırım Maliyeti (\$/yıl)</b>	<b>Toplam Maliyet (\$/yıl)</b>
1	$2,83.10^6$	$5,62.10^6$	$8,45.10^6$
2	$2,83.10^6$	$2,81.10^6$	$5,64.10^6$
3	$2,83.10^6$	$1,87.10^6$	$4,70.10^6$
4	$2,83.10^6$	$1,40.10^6$	$4,24.10^6$
5	$2,83.10^6$	$1,12.10^6$	$3,95.10^6$

$\Delta T_{\min}=10\text{ }^{\circ}\text{C}$  sıcaklık değeri için faiz geri ödemelerini içeren yıllık maliyet yöntemi seçildiğinde ve faiz yüzdesi %10 alındığında, farklı geri ödeme sürelerine karşılık gelen maliyet değerleri Çizelge 4.21'de verilmiştir.

**Çizelge 4.21** Faiz geri ödemelerini içeren yıllık maliyet yöntemi için maliyet değerleri  
( $\Delta T_{\min}=10\text{ }^{\circ}\text{C}$ )

<b>Faiz Yüzdesi (%)</b>	<b>Geri Ödeme Süresi (yıl)</b>	<b>Enerji Maliyeti (\$/yıl)</b>	<b>Yatırım Maliyeti (\$/yıl)</b>	<b>Toplam Maliyet (\$/yıl)</b>
10	1	$1,98.10^6$	$1,23.10^7$	$1,43.10^7$
10	2	$1,98.10^6$	$6,47.10^6$	$8,44.10^6$
10	3	$1,98.10^6$	$4,51.10^6$	$6,49.10^6$
10	4	$1,98.10^6$	$3,54.10^6$	$5,52.10^6$
10	5	$1,98.10^6$	$2,96.10^6$	$4,94.10^6$

$\Delta T_{\min}=26\text{ }^{\circ}\text{C}$  değeri için faiz yüzdesi ve geri ödeme süreleri ve ekonomik yöntem aynı olacak şekilde alındığında bulunan maliyet değerleri Çizelge 4.22’de verilmiştir.

**Çizelge 4.22** Faiz geri ödemelerini içeren yıllık maliyet yöntemi için maliyet değerleri  
( $\Delta T_{\min}=26\text{ }^{\circ}\text{C}$ )

<b>Faiz Yüzdesi (%)</b>	<b>Geri Ödeme Süresi (yıl)</b>	<b>Enerji Maliyeti (\$/yıl)</b>	<b>Yatırım Maliyeti (\$/yıl)</b>	<b>Toplam Maliyet (\$/yıl)</b>
10	1	$2,83.10^6$	$6,18.10^6$	$9,01.10^6$
10	2	$2,83.10^6$	$3,24.10^6$	$6,07.10^6$
10	3	$2,83.10^6$	$2,26.10^6$	$5,09.10^6$
10	4	$2,83.10^6$	$1,77.10^6$	$4,60.10^6$
10	5	$2,83.10^6$	$1,48.10^6$	$4,31.10^6$

Faiz yüzdesi ve geri ödeme süreleri aynı kalacak şekilde ekonomik yöntem net bugünkü değer olarak değiştirildiğinde,  $\Delta T_{\min}=10\text{ }^{\circ}\text{C}$  ve  $\Delta T_{\min}=26\text{ }^{\circ}\text{C}$  değerleri için bulunan maliyet değerleri sırasıyla Çizelge 4.23 ve Çizelge 4.24’de verilmiştir.

**Çizelge 4.23** Net bugünkü değer yöntemi için maliyet değerleri ( $\Delta T_{\min} = 10^\circ\text{C}$ )

<b>Faiz Yüzdesi (%)</b>	<b>Geri Ödeme Süresi (yıl)</b>	<b>Enerji Maliyeti (\$/yıl)</b>	<b>Yatırım Maliyeti (\$/yıl)</b>	<b>Toplam Maliyet (\$/yıl)</b>
10	1	$1,80 \cdot 10^6$	$1,12 \cdot 10^7$	$1,30 \cdot 10^7$
10	2	$3,43 \cdot 10^6$	$1,12 \cdot 10^7$	$1,47 \cdot 10^7$
10	3	$4,92 \cdot 10^6$	$1,12 \cdot 10^7$	$1,61 \cdot 10^7$
10	4	$6,27 \cdot 10^6$	$1,12 \cdot 10^7$	$1,75 \cdot 10^7$
10	5	$7,50 \cdot 10^6$	$1,12 \cdot 10^7$	$1,87 \cdot 10^7$

**Çizelge 4.24** Net bugünkü değer yöntemi için maliyet değerleri ( $\Delta T_{\min} = 26^\circ\text{C}$ )

<b>Faiz Yüzdesi (%)</b>	<b>Geri Ödeme Süresi (yıl)</b>	<b>Enerji Maliyeti (\$/yıl)</b>	<b>Yatırım Maliyeti (\$/yıl)</b>	<b>Toplam Maliyet (\$/yıl)</b>
10	1	$2,57 \cdot 10^6$	$5,62 \cdot 10^6$	$8,19 \cdot 10^6$
10	2	$4,91 \cdot 10^6$	$5,62 \cdot 10^6$	$1,05 \cdot 10^7$
10	3	$7,04 \cdot 10^6$	$5,62 \cdot 10^6$	$1,27 \cdot 10^7$
10	4	$8,98 \cdot 10^6$	$5,62 \cdot 10^6$	$1,46 \cdot 10^7$
10	5	$1,07 \cdot 10^7$	$5,62 \cdot 10^6$	$1,63 \cdot 10^7$



## 5. SONUÇLAR

Bu çalışmada, 4 sıcak ve 5 soğuk akım içeren bir aromatik tesis için ısı değiştirici ağının tasarımı yapılmıştır. Tasarımda darboğaz analiz yöntemi kullanılmıştır. Sıcak ve soğuk akımlar arasında ısı aktarımının olabilmesi için olması gereken en küçük sıcaklık farkı kısıtı ( $\Delta T_{\min}$ ) değiştirilmiş ve bunun toplam maliyeti ne şekilde etkilediği incelenmiştir.  $\Delta T_{\min}$  değeri arttıkça, minimum sıcak servis akımı yükü ve minimum soğuk servis akımı yükü artmış, dolayısıyla enerji maliyeti artmıştır. Bununla beraber, ısı değiştirici alanındaki azalma nedeniyle, yatırım maliyeti düşmüştür, enerji ve yatırım maliyetlerinin toplamı olarak hesaplanan toplam maliyet ise  $\Delta T_{\min}$  26°C'a eşit oluncaya kadar azalmış,  $\Delta T_{\min}$ 'un daha büyük değerleri için artmıştır. Dolayısıyla, toplam maliyetin minimum olduğu değer bu sistem için 26°C olarak bulunmuştur. Bu sonuçlar, kaynaklarda verilen sonuçlarla uyum içindedir.

Ayrıca, aynı akım verileri ile  $\Delta T_{\min}=10^{\circ}\text{C}$  ve  $\Delta T_{\min}=26^{\circ}\text{C}$  değerleri için maliyet yöntemi değiştirilerek toplam maliyetin ne şekilde değiştiği incelenmiştir. Maliyet yöntemleri göz önünde tutularak sıcaklıklara göre karşılaştırma yapıldığında,  $\Delta T_{\min}=26^{\circ}\text{C}$ 'e ait maliyet değerlerinin  $\Delta T_{\min}=10^{\circ}\text{C}$ 'dakilerden daha düşük olduğu bulunmuştur. Ekonomik yöntemler karşılaştırıldığında ise, faiz geri ödemelerini içermeyen yıllık maliyet yönteminin daha düşük maliyet değerleri verdiği görülmüştür. Bütün bu hesaplamalar beş ayrı geri ödeme süresi için yapılmış ve en düşük toplam maliyet değerlerinin 5 yıllık geri ödeme değerine karşılık geldiği saptanmıştır. Dolayısıyla, bu çalışmada  $\Delta T_{\min}=26^{\circ}\text{C}$  değeri için faiz geri ödemelerini içermeyen yıllık maliyet yöntemi ile hesaplanan, 5 yıllık geri ödeme süresi olan toplam maliyet analizi sonuçlarının optimum olduğu görülmüştür.

**KAYNAKLAR**

Ahmad, S., (1985), Heat Exchanger Networks: Cost Tradeoffs in Energy and Capital, Doktora Tezi, University of Manchester.

Bejan, A., Tsatsaronis, G. ve Moran, M., (1996), Thermal Design and Optimization , John Wiley and Sons INC.

Bolat, E., (1991), Kimyasal Tesislerin Tasarımı ve Ekonomisi Ders Notları, İstanbul.

Douglas, J.M., (1988), Conceptual Design of Chemical Processes, McGraw-Hill Book Co., N.Y.

Gürkan, E.H., (1997), Bir Kimya Tesisinde Enerji Gereksinimlerinin En Aza İndirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Y.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Hall, S.G., Ahmad, S. ve Smith, R., (1990), "Capital Cost Targets for Heat Exchanger Networks Comprising Pressure Ratings and Exchanger Types", Computers and Chemical Engineering, 14(3):319-335.

Linnhoff, B. ve Flower, J.R., (1978), "Synthesis of Heat Exchanger Networks", AIChE Journal, 24(7): 633-642.

Linnhoff, B. ve Hindmarsh, E., (1983), "The Pinch Design Method for Heat Exchanger Networks", Chemical Engineering Science, 38(5):745

Linnhoff, B. ve Ahmad, S., (1984), "SuperTargeting Optimum Synthesis of Energy Management System", IChemE Annual Research Meeting.

Linnhoff, B. ve Vredeveld, D.R., (1984), "Pinch Technology Has Come of Age", Chemical Engineering Progress, 7:33-40.

Linnhoff, B., (1986), "Process Integration", Seminer Notları, UMIST.

Linnhoff, B. ve Ahmad, S., (1990), "Cost Optimum Heat Exchanger Network-1. Minimum Energy and Capital Using Simple Methods for Capital Cost", Computers and Chemical Engineering, 14(7):729-750.

Linnhoff, B., (1993), "Pinch Analysis-A-State-of-the-Art Overview", Trans. IChemE, 71(9), Part A, 503-522.

Linnhoff, B., Townsend, D.W., Boland, D., Hewitt, G.F., Thomas, B.E.A., Guy, A.R. ve Marsland, R.H., (1994), User Guide on Process Integration for the Efficient Use of Energy, IChemE, Rugby, U.K.

Polley, G.T. ve Shahi, M.H.P., (1991), "Interfacing Heat Exchanger Network Synthesis and Detailed Heat Exchanger Design", Trans. IChemE, 69(11), Part A; 445-457.

Rudman, A., (1995), "Process Integration: Planning Your Total Site", Chemical Technology Europe, January/February, 27-32.

Smith, R. ve Linnhoff, B., (1988), "The Design of Separators in The Context of Overall Process", Chem. Eng. Res. Des., 66(5):195-228.

Smith, R., (1995), Chemical Process Design, McGraw-Hill, Inc., N.Y.

Super Target-Version 4 Software, Linnhoff March Ltd., Targetting House, Gadbrook Park, Rudheath Nortwich, Cheshire CW9 7UZ, UK.



## EKLER

SUPERTARGET paket programı kullanılarak yapılan tasarımın  $\Delta T_{\min} = 10^{\circ}\text{C}$  için ekran görüntüleri aşağıda verilmiştir.

Process - 16.10st4

File Edit Options Data Tools Window Help

Data Edit

Stream Data

hot 1 Find Close 9/9

No	Type	Name	TS [C]	TT [C]	dH [MW]	MCP [MW/C]	HTC [MW/m <sup>2</sup> /C]	DT [C]	Cost [low]
1.1	Hot	hot 1	327.00	40.00	28.7	100	5.00E-4	Global	1
2.1	Hot	hot 2	220.00	160.00	9.60	160	4.00E-4	Global	1
3.1	Hot	hot 3	220.00	60.00	9.60	6.00E-2	1.40E-4	Global	1
4.1	Hot	hot 4	160.00	45.00	46.0	400	3.00E-4	Global	1
5.1	Cold	cold 1	100.00	300.00	20.0	100	3.50E-4	Global	1
6.1	Cold	cold 2	35.00	164.00	9.03	7.00E-2	7.00E-4	Global	1
7.1	Cold	cold 3	85.00	138.00	18.5	350	5.00E-4	Global	1
8.1	Cold	cold 4	60.00	170.00	6.60	6.00E-2	1.40E-4	Global	1
9.1	Cold	cold 5	140.00	300.00	32.0	200	6.00E-4	Global	1

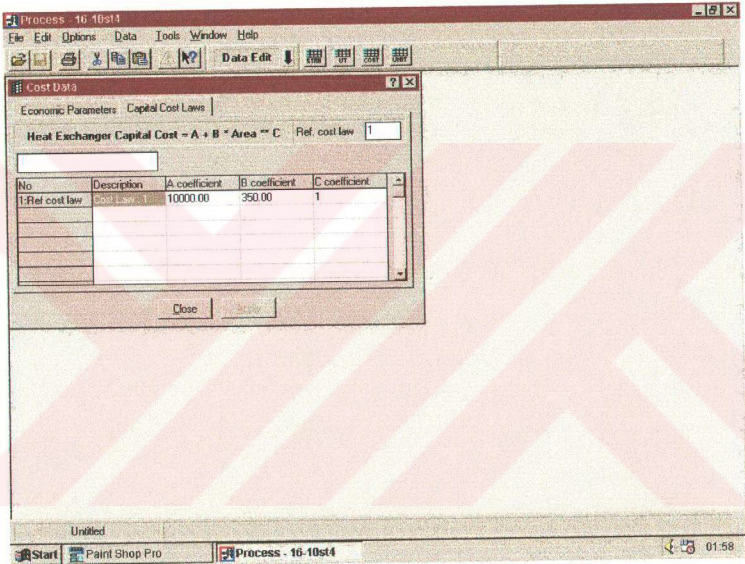
Utility Stream Data

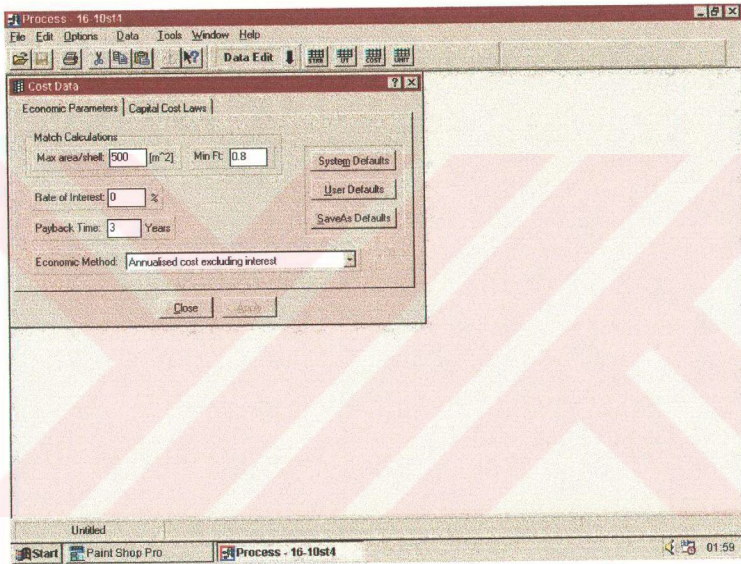
2/2 Find Close

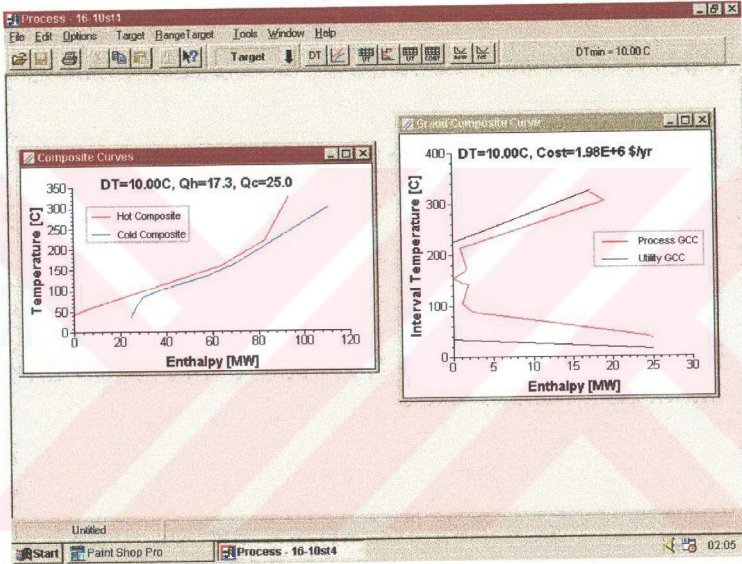
No	Type	Name	TS [C]	TT [C]	dH Ratio	HTC [MW/m <sup>2</sup> /C]	DT [C]	Cost Law	Cost [\$/(yr.MW)]	Import /Export
1.1	Hot	hot oil	330.00	230.00	1.	0.00100	Global	1	100000.00	Import
2.1	Cold	cooling water	10.00	30.00	1.	0.00250	Global	1	10000.00	Import

Untitled

Start Paint Shop Pro Process - 16.10st4 02:20







Process - 16-10st4

File Edit Network Analysis Tools Window Help

Design DT DTmin = 10.00 C

Set DTmin...

CP Matrix

DTmin = 10.00 C

Above Pinch U → 325.00  
 Below Pinch U → 15.00

MCP	100	100	6.00E-2
200	OK	OK	OK
100	No	OK	OK
7.00E-2	No	No	OK
6.00E-2	No	No	OK

Pinch Streams at 155.00 C ABOVE the pinch

hot 2 cold 5

Unlabeled Prompts for the Minimum Approach Temperature (DTmin)

Start Paint Shop Pro Process - 16-10st4 02:21



Process - 16-10st4

File Edit Database Network Analysis Tools Window Help

Design DT CP XP DTmin = 10.00 C

CP Matrix

DTmin = 10.00 C

Above Pinch U-> 325.00  
250.00-100.00

Below Pinch U-> 15.00

MCP	200	100	7.00E-2	5.00E-2
400	OK	OK	OK	OK
100	No	OK	OK	OK
6.00E-2	No	No	No	OK

Pinch Streams at 155.00 C BELOW the pinch

hot 1	cool 5
-------	--------

Untitled

Start Paint Shop Pro Process - 16-10st4 02:23

Process - 16-10st4

File Edit View Network Analysis Tools Window Help

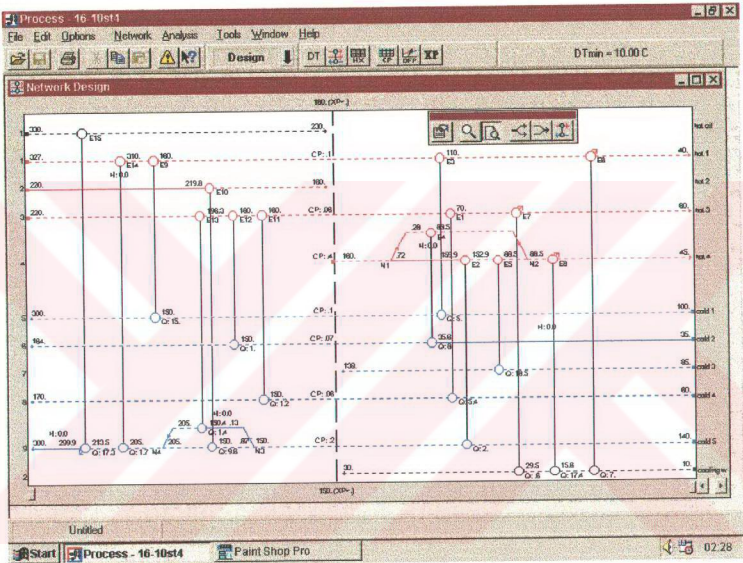
Design DT DTmin = 10.00 C

Match Report Design

No	Name	Duty (MW)	A12/A11 (m <sup>2</sup> )	Shz/Ft	Spec	OHTC (MW/m <sup>2</sup> /C)	Str.Br	Branch	Tin (C)	Tout (C)	DisApp (C)
1	E1	5.40	8108.75	17	T1,T2,T4	7.00E-5		P-3,3 hot 3	160.00	70.00	10.00
			7714.29	0.951				P-8,8 cold 4	60.00	150.00	
2	E2	2.00	904.82	2	T2,T3,T4	2.00E-4		P-4,12 P4:B4/SB1	159.85	152.91	9.85
			883.52	0.977				P-9,9 cold 5	140.00	150.00	
3	E3	5.00	2788.74	6	T1,T2,T4	2.06E-4		P-1,1 hot 1	160.00	110.00	10.00
			2428.57	0.871				P-5,5 cold 1	100.00	150.00	
4	E4	8.01	1736.03	4	T1,T2,T4	2.10E-4		P-4,13 P4:B4/SB2	160.00	88.50	10.00
			1480.73	0.853				P-6,6 cold 2	35.60	150.00	
5	E5	18.5	12741.43	26	T2,T3,T4	1.88E-4		P-4,12 P4:B4/SB1	152.91	88.50	3.50
			12566.40	0.986				P-7,7 cold 3	85.00	138.00	
6	E6	7.00	305.95	1	T1,T2,T3	4.17E-4		P-1,1 hot 1	110.00	40.00	30.00
			299.05	0.977				U-2,11 cooling water	10.00	15.60	
7	E7	6.00E-1	129.30	1	T1,T2,T4	1.33E-4		P-3,3 hot 3	70.00	60.00	30.48
			129.22	0.999				U-2,11 cooling water	29.52	30.00	
8	E8	17.4	1534.30	4	T1,T2,T3	2.68E-4		P-4,14 P: 4/M	88.50	45.00	29.40
			1528.92	0.996				U-2,11 cooling water	15.60	29.52	
9	E9	15.0	8365.23	18	T2,T3,T4	2.06E-4		P-1,1 hot 1	310.00	160.00	10.00
			7285.71	0.871				P-5,5 cold 1	150.00	300.00	
10	E10	9.57	3463.30	8	T2,T3,T4	2.40E-4		P-2,2 hot 2	219.81	160.00	10.00
			3255.34	0.940				P-9,15 PR89/SB1	150.00	205.00	
11	E11	1.20	1791.62	4	T2,T3,T4	7.00E-5		P-3,3 hot 3	180.00	160.00	10.00
			1714.29	0.957				P-8,8 cold 4	150.00	170.00	
12	E12	9.80E-1	201.08	1	T2,T3,T4	1.17E-4		P-3,3 hot 3	196.33	180.00	30.00
			263.64	0.959				P-5,5 cold 2	150.00	164.00	

Unlaid

Start Process - 16-10st4 Paint Shop Pro 02:27



Process - 16-10st4

File Edit Options Target RangeTarget Tools Window Help

Target DT min = 10.00 C

### Capital Cost Report

Economic method: Annualised cost excluding interest

	Total	Above Process Pinch	Below Process Pinch
Energy (MW)		17.3	25.0
1-1 Area (m <sup>2</sup> )	31631.84	15071.44	27031.10
1-2 Area (m <sup>2</sup> )	37193.79	16777.96	26249.32
Units	15	7	8
Shells	76	37	39

Energy cost (\$/yr)	1.98E+6
1-1 Capital cost (\$/yr)	3.74E+6
1-1 Total cost (\$/yr)	5.72E+6
1-2 Capital cost (\$/yr)	4.39E+6
1-2 Total cost (\$/yr)	6.37E+6

DTmin (C)	10.00
Min Ft	.8000
Max area/shell (m <sup>2</sup> )	500.00

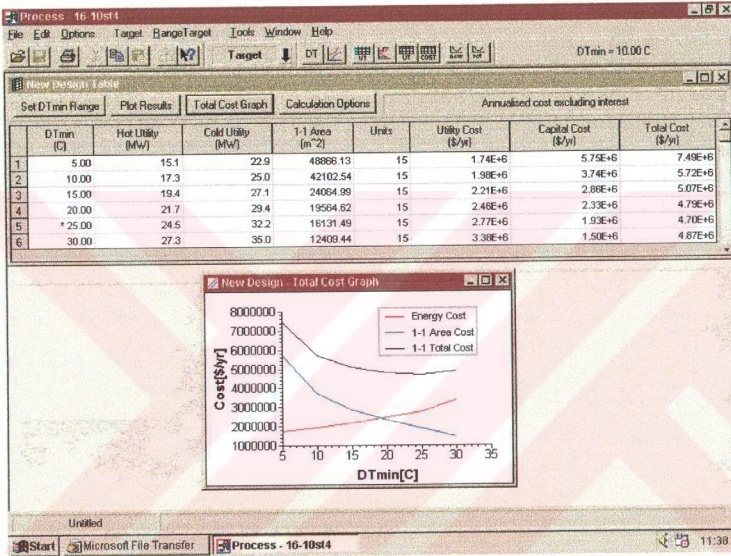
### Utility Report

DTmin = 10.00C Status: Utilities balanced

Utility Name	TS (C)	TT (C)	Duty (MW)	Total Cost (\$/yr)
1 hot oil	330.00	230.00	17.3	1.73E+6
2 cooling water	10.00	30.00	25.0	250000.00
3 Total				1.98E+6
4 Tot. Hot			17.3	1.73E+6
5 Tot. Cold			25.0	250000.00

Untitled

Start Microsoft Word Process - 16-10st4 03:36



**ÖZGEÇMİŞ**

Doğum Tarihi	06.09.1973	
Doğum Yeri	Akşehir	
Lise	1984-1991	Özel Orta Doğu Lisesi
Lisans	1991-1995	Yıldız Teknik Üniversitesi Kimya Metalurji Fakültesi Kimya Mühendisliği
Yüksek Lisans	1995-	Yıldız Teknik Üniversitesi Kimya Metalurji Fakültesi Kimya Mühendisliği
Çalıştığı Kurum	1997-	Yıldız Teknik Üniversitesi Kimya Metalurji Fakültesi Kimya Mühendisliği Araştırma Görevlisi