

T.C.
GEBZE YÜKSEK TEKNOLOJİ ENSTİTÜSÜ
MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ENÇOK ENERJİ GERİ KAZANIMLI ESNEK ISI
DEĞİŞTİRİCİ AĞLARININ TEK VE ÇOK
PERİYOT KOŞULLARI İÇİN SENTEZİ

Alptekin ÇORUHLU
YÜKSEK LİSANS TEZİ
ENERJİ SİSTEMLERİ ANABİLİM DALI

GEBZE
2000

T.C.
GEBZE YÜKSEK TEKNOLOJİ ENSTİTÜSÜ
MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ENÇOK ENERJİ GERİ KAZANIMLI ESNEK ISI
DEĞİŞTİRİCİ AĞLARININ TEK VE ÇOK
PERİYOT KOŞULLARI İÇİN SENTEZİ

Alptekin ÇORUHLU
YÜKSEK LİSANS TEZİ
ENERJİ SİSTEMLERİ ANABİLİM DALI

Tez Danışmanı
Yrd. Doç. Dr. Alp Er Ş. KONUKMAN

GEBZE

ÖZET

Bu çalışma, ısı değiştirici ağlarının esnek sentezini gerçekleştiren süperyapı tabanlı, tek basamaklı, iteratif olmayan bir karışık tamsayı doğrusal programlama formülasyonu üzerinedir. Formülasyonda sınırlama olarak kullanılan esneklik kriteri, besleme akımlarının tümünün sıcaklıklarında her yönde (artma veya azalma) aynı anda aynı miktarda olabilecek değişimlerdir. Formülasyonun amaç fonksiyonu ısıtma ve soğutma maliyetlerinin toplamının enazlanmasıdır. Formülasyonun uygulandığı örnek problemlerden, istenilen esneklik değeri için ütilite tüketimi aynı olan farklı yapılar bulunabileceği, yani problemin çözümün tekil olmadığı görülmüştür. Ayrıca, aynı ütilite tüketim değerindeki yapıların farklı esneklik indeksi değerlerine sahip olabileceği bulunmuştur.

Süperyapı tabanlı ısı değiştirici ağ sentezi formülasyonu için, literatürde, en fazla sıcak veya soğuk akım sayısı olarak önerilen süperyapı kademe sayısının, bir artırılması ile daha düşük işletme maliyetli ara bölgeler ve bu bölgeler içinde daha düşük maliyetle, aynı esneklikte çalışabilen farklı ısı değiştirici ağ yapılarının bulunabileceği gösterilmiştir. Süperyapı kademe sayısının düşürülmesiyle de daha yüksek maliyetli ve daha az sayıda muhtemel ısı değiştirici ağ yapılarının bulunabileceği ve akım sayısı + ütilite sayısı + döngü sayısı – problem sayısı olarak verilen ençok ısı değiştirici sayısının artırılmasıyla da daha düşük maliyetli ve daha fazla sayıda muhtemel ısı değiştirici ağ yapılarının bulunabileceği gösterilmiştir.

Esnek ısı değiştirici ağı sentezinde kullanılan karışık tamsayı doğrusal programlama formülasyonu, çift periyotlu ısı değiştirici ağı problemlerinin çözümü için de geliştirilmiştir. Çift periyotlu ısı değiştirici ağı sentezi problemi için, her periyodunda belli sıcaklıklara soğutulacak iki sıcak akım ve belli sıcaklıklara ısıtılacak iki soğuk akım bulunan bir örnek problem incelenmiştir. İstenilen esneklik miktarının değişimi ile çok periyotlu ısı değiştirici ağı yapısal gruplarının ve ağırlıklı toplam işletme maliyeti seviyelerinin değişimi incelenmiştir. Bu çalışmada sunulan karışık tamsayı doğrusal programlama formülasyonu ile çok periyotlu esnek ısı değiştirici ağlarının da sentezlenebileceği gösterilmiştir.

SUMMARY

This study is relevant to one-stage, non-iterative, superstructure-based-simultaneous-MILP formulation which carry out the synthesis of flexible heat exchanger networks. The flexibility criterion, used in the formulation as a restriction, is the disturbances possible for all directions (increasing and decreasing) which is occurring at the same time with equal amount. The objective function is the minimization of sum of the heating and cooling cost. From examples, for the desired flexibility amount, it is seen that different structures are possible with the same utility consumption, in other words, the solution of the problem is not singular. Additionally, it is found that the structures with same utility consumption can acquire different flexibility index.

For the superstructure-based heat exchanger network synthesis formulation, by increasing the superstructure stage number which is recommended as the maximum number of the hot or cold stream in the literature, it is shown that regions with lower utility consumption and in this regions different structures which can be operate at the same flexibility with lower utility consumption are available. It is also shown that by decreasing the superstructure stage number, the possible number of heat exchanger network structures with higher utility consumption is increased. By increasing the maximum number of heat exchanger which is given as stream number + utility number + loop number – problem number, it is found that the possible number of heat exchanger network structures with lower utility consumption is incereased.

Mixed integer linear programming formulation used to synthesize the flexible heat exchanger networks is improved for the solution to the multi-period heat exchanger network problems. An example problem having two hot stream to be cooled to the certain temperatures and two cold stream to be heated to the certain temperatures for each period is examined. With the variation of the desired flexibility amount, the variation of the structural heat exchanger network groups and utility consumption levels are examined. It is demonstrated that it is possible to synthesize multi-period flexible heat exchanger networks via the mixed integer linear programming formulation which is presented in this study.

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım sırasında her konuda yardımcı olan ve desteklerini esirgemeyen tez danışmanım Yrd. Doç. Dr. Alp Er Ş. Konukman'a ve Yrd. Doç. Dr.ERCÜMENT ÖZER'e teşekkürü bir borç bilirim.

Çok değerli zamanlarından tezime ve tez sınavıma vakit ayıran Prof. Dr. Mahmut Bayramoğlu ve Doç. Dr. Uğur Akman'a teşekkür ederim.

Tez çalışmalarım esnasında bana her türlü kolaylığı gösteren sıralı komutanlarıma ve mesai arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Manevi desteklerini sürekli hissettiğim aileme ve sevgili eşim Elif Çoruhlu'ya teşekkürü bir borç bilirim.

Bu çalışma GYTE Araştırma Fonu tarafından desteklenmiştir (Proje No : 99B030602).

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

	SAYFA
ÖZET	iv
SUMMARY	v
TEŞEKKÜR	vi
İÇİNDEKİLER DİZİNİ	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	xi
TABLOLAR DİZİNİ	xvi
1.GİRİŞ	1
2.ISI DEĞİŞTİRİCİ AĞLARI VE ESNEKLİK KAVRAMI İLE İLGİLİ ÇALIŞMALARA KISA BİR BAKIŞ	3
2.1 Isı Değiştirici Ağı Probleminin Kısa Bir Tarihçesi	3
2.2 Isı Değiştirici Ağlarının Esneklik Kavramının Kısa Bir Tarihçesi	5
3.‘AŞAĞI AKIM PATİKALARI’ YÖNTEMİ VE ESNEKLİK İNDEKSİ KAVRAMI	9
3.1 ‘Aşağı Akım Patikaları’ Yöntemi	9
3.2 Esneklik İndeksi	13
3.3 Problemin Esneklik İndekslerini Hesaplanması	14
4.SÜPERYAPI TABANLI KARIŞIK TAMSAYI DOĞRUSAL OLMAYAN PROGRAMLAMA FORMÜLASYONU İLE ISI DEĞİŞTİRİCİ AĞI SENTEZİ	21
5.ESNEKLİK İNDEKSİNİ İÇİNE ALAN SÜPERYAPI FORMÜLASYONU	26
6.ÖRNEK PROBLEMLER	33
6.1 Problem-1	33
6.1.1 Durum Çalışması-1	34
6.1.2 Durum Çalışması-2	55
6.1.3 Durum Çalışması-3	59
6.1.4 Durum Çalışması-4	63
6.1.5 Durum Çalışmalarının Isı Değiştirici Sayısına Göre Değerlendirilmesi	67

6.1.6 Problem-1'in Durum Çalışmalarının Değerlendirilmesi	69
6.2 Problem-2	72
6.2.1 Durum Çalışması-1	72
6.2.2 Durum Çalışması-2	80
6.2.3 Durum Çalışması-3	86
6.2.4 Durum Çalışması-4	91
6.2.5 Durum Çalışmalarının Isı Değiştirici Sayısına Göre Değerlendirilmesi	95
6.2.6 Problem-2'in Durum Çalışmalarının Değerlendirilmesi	97
7. ÇOK PERİYOTLU ESNEK ISI DEĞİŞTİRİCİ AĞLARININ SÜPERYAPI TABANLI MILP FORMÜLASYONU İLE SENTEZİ	100
7.1 Problemin Tanımı	100
7.1.1 Durum Çalışması-1	101
7.1.2 Durum Çalışması-2	106
7.1.3 İki Periyotlu IDA Sentez Probleminin Sonuçları	111
8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	112
KAYNAKLAR	115
ÖZGEÇMİŞ	119
EKLER	
EK-1 Tek Bir Bozucu Etki Yönü İçin Isı Değiştirici Ağının Esnekliğinin Bulunması	
EK-2 GAMS Hakkında Kısa Bilgi	
EK-3 Ençok Esnekliğe Kadar Hesap Yötemini Gösteren Akış Diagramı	
EK-4 İstenilen Esneklik İndeksi İçin Tek Periyotlu Isı Değiştirici Ağ Probleminin Süperyapı Tabanlı MILP Formülasyonu ile Çözümü	
EK-5 Her Periyodu İçin İstenilen Esneklik İndeksinde İki Periyotlu Isı Değiştirici Ağ Probleminin Süperyapı Tabanlı MILP Formülasyonu İle Çözümü	

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	Açıklama
A	Enerji dengesi kısıtlamalarının genel formda kullanılan matrisi
b	Enerji dengesi kısıtlamalarının genel formda kullanılan vektörü
C	Yaklaşım sıcaklığı kısıtlamalarının genel formda kullanılan matrisi
CP	Soğuk proses akımı
CU	Soğutucu
D	Yaklaşım sıcaklığı kısıtlamalarının genel formda kullanılan matrisi
d	Tasarım değişkenleri vektörü
$dt_{i,j,k,n}$	n köşesinde k kademesinde i, j karşılaşması için yaklaşım sıcaklığı
$dt_{cu,i,n}$	n köşesinde i ve soğutucu karşılaşması için yaklaşım sıcaklığı
$dth_{u,j,n}$	n köşesinde j ve ısıtıcı karşılaşması için yaklaşım sıcaklığı
E	Isı yükü kısıtlamalarının genel formda kullanılan matris
EIDS	Ençok ısı değiştirici sayısı
F	Isı sığası
G	Isı yükü kısıtlamalarının genel formda kullanılan matris
g	Eşitsizlik kısıtlamaları vektörü
H	Enaz ısıtma ihtiyacı
h	Eşitlik kısıtlamaları vektörü
HP	Sıcak proses akımı
HU	Isıtıcı
ID	Isı değiştirici
IDA	Isı değiştirici ağı
i	Sıcak akımı tanımlayan indis
in	Giriş
j	Soğuk akımı tanımlayan indis
k	Süperyapı kademesini tanımlayan indis
l	Belirsizlik yönü
MINLP	Karışık Tamsayı Doğrusal Olmayan Programlama
MILP	Karışık Tamsayı Doğrusal Programlam
n	Verteks yönü belirleyicisi
N	Toplam köşe sayısı

o	Nominal işletme koşulları
out	Çıkış
p	Sabitlenmiş parametreler vektörü
p	Yaklaşım sıcaklığı kısıtlamalarının genel formda kullanılan vektörü
$q_{i,j,k,n}$	n köşesinde k kademesinde i ve j akımları arasındaki ısı transferi
$q_{cu,i,n}$	n köşesinde i akımı ile soğutucu arasındaki ısı transferi
$q_{hu,j,n}$	n köşesinde j akımı ile ısıtıcı arasındaki ısı transferi
$R_{i,n}$	i akımı için -1 ile +1'in N kombinasyonu
$R_{j,n}$	j akımı için -1 ile +1'in N kombinasyonu
S	Esneklik indeksini tanımlamak için kullanılan hiperdikdörtgenin skala faktörü
ST	Kademe
TIN	Akımın giriş sıcaklığı
TOUT	Akımın çıkış sıcaklığı
$T_{giriş}$	Akımın giriş sıcaklığı
$T_{çıkış}$	Akımın çıkış sıcaklığı
t	Sıcaklık vektörü
$t_{i,k,n}$	n verteksinde k kademesinde sıcak uçta i akımının sıcaklığı
$t_{j,k,n}$	n verteksinde k kademesinde sıcak uçta j akımının sıcaklığı
T	Sıcaklık
u	Kontrol/bağımsız değişkenler vektörü
v	Durum ve kontrol değişkenleri vektörü
w	s akımının ısı kapasite yükü
z	İkili değişkenler vektörü
$z_{i,j,k}$	k kademesinde i ve j karşılaşması olması için ikili değişken
$z_{cu,i}$	k kademesinde i ve soğutucu karşılaşması olması için ikili değişken
$z_{hu,j}$	k kademesinde j ve ısıtıcı karşılaşması olması için ikili değişken
Γ	Sıcaklık değişimi için üst sınır
θ	Belirsiz parametreler vektörü
Ω	Isı transferi için üst sınır
Φ	Amaç fonksiyonu
δ	Esneklik indeksi (skalar), δ^*
α	Enaz ısıtma amacını sağlayan faktör

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil	Sayfa
3.1 H1 Akımının C1 Akımı Üzerine Etki Patikaları	10
3.2 C2 Akımının C1 Akımı Üzerine Etki Patikaları	11
3.3 Üçüncü Isı Değiştiricinin Kaldırıldığı Yapı	12
3.4 İkinci ve Dördüncü Isı Değiştiricinin Yer Değiştirdiği Yapı	12
3.5 Kotjabasakis Ve Linnhoff'un (1986) İnceledikleri Örnek Problem Üzerinden Elde Ettikleri Pinch Çözümü	15
3.6 Üçüncü Isı Değiştiricinin Kaldırıldığı Yapı	17
3.7 İkinci ve Dördüncü Isı Değiştiricinin Yer Değiştirdiği Yapı	20
4.1 Yee And Grossmann'ın İki Kademeli Süperyapısı	21
6.1 İki Kademeli Süperyapı ve Akım Verileri	34
6.2 Toplam İşletme Maliyetinin Esneklik İndeksine Göre Değişimi	38
6.3 Nominal Çalışma Şartlarında A'dan D3'e Toplam İşletme Maliyetlerinin Esneklik İndeksine (δ^*) Göre Değişimi	39
6.4 P1D1-A Yapısı	40
6.5 P1D1-B1 Yapısı	43
6.6 P1D1-B2 Yapısı	44
6.7 P1D1-B3 Yapısı	44
6.8 P1D1- B4 Yapısı	45
6.9 P1D1-B1, P1D1-B2, P1D1-B3 ve P1D1-B4 B4 Yapıları	45
6.10 P1D1-B5 Yapısı	46
6.11 P1D1-B6 Yapısı	47
6.12 P1D1-B7 Yapısı	48
6.13 P1D1-B8 Yapısı	49

6.14	P1D1-C1 Yapısı	50
6.15	P1D1-C2 Yapısı	51
6.16	P1D1-C3 Yapısı	51
6.17	P1D1-C4 Yapısı	52
6.18	P1D1-D1 Yapısı	53
6.19	P1D1-D2 Yapısı	53
6.20	P1D1-D3 Yapısı	54
6.21	Üç Kademeli Süperyapı	55
6.22	Toplam İşletme Maliyetinin Esneklik İndeksine Göre Değişimi	56
6.23	Nominal Çalışma Şartlarında A'dan E3'e Toplam İşletme Maliyetlerinin Esneklik İndeksine (δ^*) Göre Değişimi	57
6.24	P1D1-B Yapısı	58
6.25	Nominal Çalışma Şartlarında A'dan F'e Toplam İşletme Maliyetlerinin Esneklik İndeksine (δ^*) Göre Değişimi	60
6.26	P1D1-A Yapısı	60
6.27	P1D1-B Yapısı	61
6.28	P1D1-C Yapısı	61
6.29	P1D1-D Yapısı	62
6.30	P1D1-E Yapısı	62
6.31	P1D1-F Yapısı	63
6.32	Toplam İşletme Maliyetinin Esneklik İndeksine Göre Değişimi	64
6.33	Nominal Çalışma Şartlarında A'dan C'e Toplam İşletme Maliyetlerinin Esneklik İndeksine (δ^*) Göre Değişimi	64
6.34	P1D4-A Yapısı	65
6.35	P1D4-B1 Yapısı	66
6.36	P1D4-B2 Yapısı	66
6.37	P1D4-C Yapısı	67

6.38	Problem-1 İçin Altı Isı Değiştiricili Yapılar	68
6.39	Problem-1 İçin Beş Isı Değiştiricili Yapılar	68
6.40	Problem-1 İçin Dört Isı Değiştiricili Yapılar	69
6.41	İkinci Problem İçin Üç Kademeye Çıkarılmış Süperyapı ve Akım Verileri	72
6.42	Toplam İşletme Maliyetinin Esneklik İndeksine Göre Değişimi	73
6.43	Nominal Çalışma Şartlarında A1'dan C2'e Toplam İşletme Maliyetlerinin Esneklik İndeksine (δ^*) Göre Değişimi	74
6.44	P2D1-A1 Yapısı	75
6.45	P2D1-A2 Yapısı	75
6.46	P2D1-B1 Yapısı	76
6.47	P2D1-B2 Yapısı	76
6.48	P2D1-B3 Yapısı	76
6.49	P2D1-B4 Yapısı	77
6.50	P2D1-B5 Yapısı	77
6.51	P2D1-B6 Yapısı	77
6.52	P2D1-B7 Yapısı	78
6.53	P2D1-B8 Yapısı	78
6.54	P2D1-B9 Yapısı	78
6.55	P2D1-B10 Yapısı	79
6.56	P2D1-C1 Yapısı	79
6.57	P2D1-C2 Yapısı	80
6.58	Toplam İşletme Maliyetinin Esneklik İndeksine Göre Değişimi	81
6.59	Nominal Çalışma Şartlarında A1'dan C2'e Toplam İşletme Maliyetlerinin Esneklik İndeksine (δ^*) Göre Değişimi	82
6.60	P2D2-A Yapısı	83

6.61	P2D2-B1 Yapısı	83
6.62	P2D2-B2 Yapısı	84
6.63	P2D2-B3 Yapısı	84
6.64	P2D2-B4 Yapısı	84
6.65	P2D2-B5 Yapısı	85
6.66	P2D2-B6 Yapısı	85
6.67	P2D2-B7 Yapısı	85
6.68	Toplam İşletme Maliyetinin Esneklik İndeksine Göre Değişimi	87
6.69	Nominal Çalışma Şartlarında A1'dan C2'e Toplam İşletme Maliyetlerinin Esneklik İndeksine (δ^*) Göre Değişimi	88
6.70	P2D3-A1 Yapısı	88
6.71	P2D3-A2 Yapısı	89
6.72	P2D3-B Yapısı	89
6.73	P2D3-C1 Yapısı	90
6.74	P2D3-C2 Yapısı	90
6.75	Toplam İşletme Maliyetinin Esneklik İndeksine Göre Değişimi	91
6.76	Nominal Çalışma Şartlarında A1'dan C2'e Toplam İşletme Maliyetlerinin Esneklik İndeksine (δ^*) Göre Değişimi	92
6.77	P2D4-A1 Yapısı	93
6.78	P2D4-A2 Yapısı	93
6.79	P2D4-A3 Yapısı	94
6.80	P2D4-A6 Yapısı	94
6.81	Problem-2 İçin Yedi Isı Değiştiricili Yapılar	96
6.82	Problem-2 İçin Altı Isı Değiştiricili Yapılar	96
6.83	Problem-2 İçin Beş Isı Değiştiricili Yapılar	97

7.1	Nominal Çalışma Şartlarında A1'dan E3'e Toplam İşletme Maliyetlerinin Esneklik İndeksine (δ^*) Göre Değişimi	102
7.2	Nominal Çalışma Şartlarında A1'dan C'e Toplam İşletme Maliyetlerinin Esneklik İndeksine (δ^*) Göre Değişimi	103
7.3	A Yapısı	103
7.4	B1 Yapısı	104
7.5	B2 Yapısı	104
7.6	B3 Yapısı	105
7.7	B4 Yapısı	105
7.8	C Yapısı	106
7.9	Ağırlıklı Toplam İşletme Maliyetinin İstenilen Esneklik Miktarına Göre Değişimi	107
7.10	A Yapısı	108
7.11	B Yapısı	109
7.12	Ençok Dokuz Isı Değiştiricili Çok Periyotlu Ağların Ağırlıklı Toplam İşletme Maliyetinin İstenilen Esneklik Miktarına Göre Değişimi	110

TABLOLAR DİZİNİ

Tablo	Sayfa
3.1 Kotjabasakis ve Linnhoff'un (1986) Örnek Isı Değiştirici Ağ Probleminin Tanımı	9
3.2 Şekil 3-5'deki Yapı İçin Ençok Esneklik Değerleri	17
3.3 Şekil 3-6'daki Yapı İçin Ençok Esneklik Değerleri	19
6.1 Durum-1 İçin Akım Verileri	33
6.2 İstenilen Esneklik İndeksi Değişimi ile Isı Değiştirici Ağlarının ve Maliyetlerinin Değişimi	35
6.3 P1D1-A Yapısının Tüm Bozucu Etki Yönleri İçin Ençok Esneklik Değerleri (δ)	42
6.4 Durum Çalışması-1 Sonucunda Bulunan Yapılar ve Esneklik İndeksleri	54
6.5 Durum Çalışması-2 Sonucunda Bulunan Yapılar ve Esneklik İndeksleri	59
6.6 Durum Çalışması-3 Sonucunda Bulunan Yapılar ve Esneklik İndeksleri	63
6.7 Durum Çalışması-4 Sonucunda Bulunan Yapılar ve Esneklik İndeksleri	67
6.8 Değişik Durum Çalışmalarında Toplam İşletme Maliyeti Seviyelerinin İstenilen Esneklik İndeksine Göre Değişimi	70
6.9 Durum Çalışması-1 Sonucunda Bulunan Yapılar ve Esneklik İndeksleri	80
6.10 Durum Çalışması-2 Sonucunda Bulunan Yapılar ve Esneklik İndeksleri	86
6.11 Durum Çalışması-3 Sonucunda Bulunan Yapılar ve Esneklik İndeksleri	91
6.12 Durum Çalışması-4 Sonucunda Bulunan Yapılar ve Esneklik İndeksleri	95

6.13	Değişik Durum Çalışmalarında Toplam İşletme Maliyeti Seviyelerinin İstenilen Esneklik İndeksine Göre Değişimi	98
7.1	Birinci Periyot İçin Isı Değiştirici Ağı Problem Verileri	101
7.2	İkinci Periyot İçin Isı Değiştirici Ağı Problem Verileri	101

1. GİRİŞ

1970'lerdeki iki büyük enerji darboğazı sonrasında, atık enerjiyi maksimum miktarda geri kazanmayı hedefleyen pinch metodolojisi özellikle kimya sanayinde yoğun olarak kullanılmaya başlamıştır. Pinch yöntemi, bir proseste belirli debi ve sıcaklıklarda soğutulacak n_h sıcak akım ile belirli debi ve sıcaklıklarda ısıtılacak n_c soğuk akım olması durumunda maksimum enerji geri kazanımını sağlayan ısı değiştirici, ısıtıcı ve soğutuculardan oluşan Isı Değiştirici Ağı'nın (IDA) sentezini hedeflemektedir. Yöntem tanımından da anlaşılacağı gibi ısı değiştirici ağı sentezi problemini, akımların sabit debi ve sıcaklık değerlerine göre irdelemektedir. Buna karşı uygulamada akımların debi ve sıcaklıkları çeşitli bozucu etkilere maruz kalırlar. Bu durum çok sıkı termodinamik kısıtlar altında çalışan ve sentezlenen ağı çalışamaz kılabilir. Tasarlanan ağın, kaynak akımlarının debi ve sıcaklıklarındaki değişimleri ne ölçüde tolere edebileceği (esneklik) ile ilgili sayısal ölçütler (Swaney and Grossmann, 1985; Grossmann and Floudas, 1987) ve esnekliği artırmak için pinch sonucu sentezlenen yapıların daha sonra höristik, algoritmik ve evrimci yollarla değiştirilmesini sağlayan çeşitli yaklaşımlar literatürde sunulmuştur (Linnhoff; 1979,1983).

Bu çalışmada, maksimum enerji geri kazanım miktarını esneklik kriterleriyle aynı anda değerlendirip tek adımda esnek ağ sentezini gerçekleştiren bir algoritmik yaklaşım sunulmuştur. Yaklaşım bütün olası sıcak-soğuk akım karşılaşmalarını içeren bir süperyapının, tasarımcının tanımladığı esneklik kısıtları altında karışık tamsayı doğrusal programlama tekniği ile optimizasyonu temelinde olmaktadır. Yöntem pinch tekniği ile bulunan yapıların esneklik değerlerinden daha esnek yapıların sentezlenmesine olanak tanıyarak uygulamada daha güvenli sistemlerin tasarlanmasına imkan sağlamaktadır. Formülasyon, literatürden seçilen örnek IDA problemleri üzerinde sınanmış ve esneklik kriterleri ile maksimum enerji geri kazanım miktarları arasındaki ekonomik ödünleşmeler bu problemler üzerinde incelenmiştir.

İkinci bölümde, ençok enerji geri kazanımlı ısı değiştirici ağlarının sentez/tasarımı ve ısı değiştirici ağları esneklik sentezi üzerine literatürde bulunan çalışmalar sunulmaktadır.

Üçüncü bölümde, esnek ağlar elde etmek için Kotjabasakis and Linnhoff (1986) tarafından önerilen ‘Aşağı Akım Patikaları’ yöntemi pinch çözümü yapılmış örnek ısı değiştirici ağ problemi üzerinde açıklanmış, Swaney and Grossmann (1985) ve Grossmann and Floudas’ın (1987) kimyasal süreçlerin esneklikleri ve esneklik indeksi üzerine geliştirdikleri genel formülasyon verilmiş ve bu formülasyon ile Kotjabasakis and Linnhoff’un (1986) örnek ısı değiştirici ağ problemi tartışılmıştır.

Dördüncü bölümde, enaz (minimum) yıllık maliyetle ısı değiştirici ağlarının sıcak ve soğuk akımlarının soğutma ve ısıtma ihtiyaçlarını karşılayabilmek amacıyla Yee and Grossmann (1990) tarafından geliştirilen iki kademeli süperyapı ve süperyapı formülasyonu açıklanmıştır.

Beşinci bölümde, Yee and Grossmann’ın (1990) önerdiği süperyapı üzerinden istenilen esneklik hedefi için minimum işletme maliyetli ısı değiştirici ağlarının sentezini sağlayan karışık tamsayı doğrusal programlama formülasyonu verilmiştir.

Altıncı bölümde, sunulan formülasyon literatürden seçilmiş örnek ısı değiştirici ağ problemleri üzerinde sınanmıştır.

Yedinci bölümde, örnek ısı değiştirici ağ probleminin çok periyotlu, her bir periyodu için termodinamik olarak mümkün ençok ısı geri kazanım miktarını sağlayan, ayrı ayrı tanımlanabilen esneklik indeksi kısıtlamaları altında tek adımda sentezleyen bir eniyileme formülasyonu ile çözümü yapılmıştır.

Sekizinci bölüm, bu çalışmadan elde edilen sonuçlara ve ileride yapılması olası önerilere adanmıştır.

2. ISI DEĞİŞTİRİCİ AĞLARI VE ESNEKLİK KAVRAMI İLE İLGİLİ ÇALIŞMALARA KISA BİR BAKIŞ

Ekonomik ve endüstriyel gelişmenin en önemli girdilerinden birisi enerjidir. Gelişmekte olan ülkelerde sürekli artan bir enerji ihtiyacı mevcuttur. 1973 ve 1979 yıllarında petrol fiyatlarındaki şok artışlar sonrası yaşanan enerji darboğazı birçok ülkeyi enerji politikalarını yeniden gözden geçirmeye zorlamıştır. Enerji ile ilgili arz talep dengesi göz önüne alındığında sürekli artan enerji talebine karşılık enerji arzının aynı oranda artması muhtemel görülmediğinden enerji tasarrufu büyük önem kazanmaktadır. Enerji tasarrufu her türlü proseste, sistemde, işletmede uygulanabilir. Kimyasal üretim süreçlerinde ortaya çıkan atık ısıнын proses akımlarından geri kazanılıp en ekonomik yolla proses içinde değerlendirilmesini sağlayan ısı değiştirici ağlarının tasarımı da ürün kalitesinden, güvenlikten ve çevresel tüm koşullardan fedakarlık etmeksizin ve üretimi azaltmaksızın enerjinin daha verimli kullanımı doğrultusunda yapılandırılmış ve organize edilmiş disiplinli enerji tasarrufu çalışmalarından birisidir.

Bu bölümde maksimum enerji geri kazanımlı ısı değiştirici ağları ve bu ağların esneklikleri üzerine literatürde olan çalışmalar kısaca sunulmaktadır.

2.1 Isı Değiştirici Ağı Probleminin Kısa Bir Tarihçesi

Masso and Rudd (1969) tarafından ısı değiştirici ağı (IDA) tasarım probleminin standart tanımı yapılmıştır. Isı değiştirici ağ problemi *‘belirli bir sıcaklıktan belirli bir sıcaklığa soğutulacak n_H sıcak akım ve belirli bir sıcaklıktan belirli bir sıcaklığa ısıtılacak n_C soğuk akım verilmesi durumunda; ısı değiştirici, ısıtıcı ve soğutuculardan oluşan en ekonomik ağın tasarlanması’* olarak tanımlanmıştır.

Nishida *et. al.* (1977) minimum ütilite tüketimli ısı değiştirici ağları için enaz toplam ısı transfer alanını hedefleyen bir yöntem geliştirmişlerdir. Yöntem stratejileri

sıcak ve soğuk proses akımları arasında maksimum miktarda ısı transferi gerçekleştiren minimum işletme ve yatırım maliyetli bir ağ tasarlamaktır. Büyüklüğü 4-10 besleme akımı arasında değişen örnek IDA problemleri üzerinde toplam maliyeti minimize eden ağ yapılarını bulmaya çalışmışlardır.

Linnhoff *et. al.* (1979, 1983) tarafından ısı değiştirici ağlarının sentezi için pinch yöntemi geliştirilmiştir. Yöntemin çıkış noktası ısı değiştirici ağları için enaz ısıtma ve soğutma ihtiyacını hesaplamak olmuştur. Bu hesaplama herhangi bir ısı değiştirici ağı tasarlamadan yapılmaktadır. Ayrıca ağ sentezlenmeden, bu minimum ısıtma/soğutma ihtiyacını sağlayan enaz ısı değiştirici sayısıda bulunabilmektedir. Daha sonra yapılacak olan ısı değiştirici ağı tasarımında, bulunan enaz enerji ihtiyacı ve enaz ısı değiştirici sayısı hedef olarak alınmaktadır. Sıcak ve soğuk besleme akımları arasında birinci ve ikinci kanun analizleri yapılmaktadır. Akım karşılaşmaları için istenilen enaz yaklaşım sıcaklığı miktarları tespit edilmekte, oluşturulan iki sıcaklık cetveli üzerinden hesaplamalar yapılmaktadır. Şelale diyagramları çıkarılmakta, pinch sıcaklığı bulunmakta ve bu noktada cetveller ikiye bölünmektedir. Pinch sıcaklığı üzerinde ısıtıcıdan gerekli enerji alınmakta, altında ise fazla enerji soğutucuya gönderilmektedir. Sonuçlar üzerinden sıcaklık-entalpi diagramları oluşturulmakta ve enaz enerji gereksinimli, enaz ısı değiştirici sayılı ısı değiştirici ağlarının sentezleri yapılmaktadır.

Papoulias and Grossmann (1983) tarafından farklı yükleme modelleri en çok enerji geri kazanımı sağlayan ısı değiştirici ağlarının sentezi için kullanılmıştır. Doğrusal programlama modelleri minimum işletme harcamalarını tahmin etmek için kullanılmıştır. Önerdikleri karışık tamsayı doğrusal programlama modeli ünite sayısının enazlandığı, akım bölünmelerinin önlenmediği ağlarda en düşük işletme maliyetini vermektedir. Kimyasal prosesler için karışık tamsayı doğrusal programlama yaklaşımı içinde yükleme modelinin kullanılabileceği gösterilmiştir.

Yee *et. al.* (1990a,1990b) işletme maliyetlerinin, ısı değiştirici alanlarının ve akım karşılaşmalarının aynı anda eniyilendiği doğrusal olmayan bir karmaşık tamsayı modeli geliştirmişlerdir. Bu model her kademesinde sıcak ve soğuk akımlar arasında muhtemel bütün karşılaşmaları gösteren bir süperyapıya dayanmaktadır.

Akımlar arasında ısı transferini gerçekleştiren ısı değiştiricileri, ısı değiştiriciler sayesinde hedef sıcaklıklara ulaşamadığı durumlarda akımları ısıtmak/soğutmak için kullanılacak ısıtıcıları/soğutucuları süperyapıya yerleştirilmiştir. Enerji geri kazanımı, ısı değiştirici, ısıtıcı ve soğutucu ısı yükleri, enaz yaklaşım sıcaklıkları ve akım karşılaşmaları sabit tutulmamıştır. Süperyapı içindeki kademe sayısı en çok sıcak veya soğuk akım sayısı olarak önerilmiştir. Tasarladıkları süperyapı pinch noktası kavramıyla ilgili h ristik yaklaşımlara dayanmamaktadır.

Quesada and Grossmann (1993) tasarlanmış topoloji ile ısı değiştirici ağlarının global eniyilenmesi üzerinde  al mışlardır. Olurlu bölgenin sınırları içinde oldukça doğru sonuçlar veren tahmin problemine dayalı global bir eniyileme algoritması geliştirmişlerdir. Tahmin problemlerini doğrusal ve doğrusal olmayan tahmin fonksiyonlarından oluşturmuşlardır. Oluşturdukları algoritmanın özelliklerini ve performansını örnek problemler üzerinde göstermişlerdir.

Zamora and Grossmann (1998) doğrusal alan maliyeti ve akım bölünmeleri ile ilgili basitleştirilmiş kabullenmelerle Yee and Grossmann (1990) tarafından geliştirilen kar  k tamsayı doğrusal olmayan programlama (MINLP, Mixed Integer Non Lineer Programming) modelini çözmek için global eniyileme algoritması oluşturmuşlardır. Detaylı bir MINLP modeli sunulup tasarlanmış topoloji ile ısı değiştirici a ları  zerine Quesada and Grossmann'ın (1993) yaptığı global eniyileme  al ması kısaca özetlenmiştir. Doğrusal ve doğrusal olmayan tahmin fonksiyonları konveks MINLP modelinde birleştirilmiştir. Tek  niteli ısı değiştirici sistemi analiz edilmiş, ısı değiştiricilerin tahmini için termodinami e dayalı yeni tahmin fonksiyonları geliştirilmiştir. Isı transfer denklemleri ısı değiştirici alan hesaplamaları için ikinci tahmin denklemi takımına d n  t r lm   t r. Her iki takım tahmin denklemlerinin de konveks olduğu gösterilmiştir.

2.2 Isı De i tirici Ağlarının Esneklik Kavramının Kısa Bir Tarihçesi

Saboo and Morari (1984) belirli sıcaklıklar arasında  al  an ısı değiştiriciler için oldukça etkili, basit ve güvenilir yöntemler geli tirildi ini fakat belirlenmiş akım

miktarlarında ve sıcaklık sınırlarında olmasına oldukça az rastlanılan endüstriyel ortamın belirsizlikleri içinde *esnek* ısı değiştirici ağlarına ihtiyaç olduğunu belirtmişlerdir. Höristik yaklaşımlarla tasarlanan ağların şartlar değiştiğinde etkinliklerinin oldukça düştüğünü ve hatta çalışamaz duruma bile geldiklerini göstermişlerdir. Bir ağın esnekliğini artırmak için ısı değiştirici sayısını artırmaktan ziyade ağın yapısını etkili bir şekilde oluşturmuşlardır. Az sayıda ısı değiştiriciye sahip fakat uygun oluşturulmuş ağ yapısının ısı değiştirici sayısı daha fazla olan ağlardan daha esnek bir davranış gösterdiğini bulmuşlardır. Bu çalışma sonucunda belirlenmiş besleme akım sıcaklıklarında meydana gelebilecek değişimlere dayanabilen ve aynı zamanda maksimum enerji geri kazanımını garanti eden ısı değiştirici ağ sentezini oluşturabileceklerini iddia etmişlerdir.

Halemane and Grossmann (1983) tarafından besleme akım sıcaklıklarında, miktarlarında, basınçlarında olabilecek muhtemel değişimlerin sistemin çalışması üzerine olan etkilerinin hesap edilmesi için yeni bir matematiksel formülasyon geliştirilmiştir. Sonsuz sayıda kısıtlamalara ve değişkenlere sahip olan formülasyon oldukça geneldir ve eniyi tasarıma esnekliğin nasıl katılacağı üzerine genel bir bakış ve anlayış getirmiştir. Kısıtlama fonksiyonlarının konveks olduğu durumlarda problemi çözmek için bir çözüm algoritması önerilmiştir.

Swaney and Grossmann (1985) tarafından kimyasal proseslerin esnekliğini tanımlamak için *esneklik indeksi* kavramı ve bu kavram ile ilgili iki algoritma geliştirilmiştir. Geliştirilen algoritmalar olurlu operasyon için kritik noktaların, belirsiz parametrelerin uç değerlerine (köşe noktalarına) uzandığı kabulüne dayanmaktadır. Proses tasarımında esneklik indeksinin kullanımını ve algoritmaların kullanım etkinliklerini göstermek için bir kaç örnek problem üzerinde algoritmalar kullanılmıştır.

Grossmann and Floudas (1986) tarafından kimyasal proseslerde esneklik analizi için aktif kısıtlama stratejisi kullanılmıştır. Tasarım esnasında esnekliği sınırlayan kısıtlamaların özelliklerinden faydalanılarak esneklik analizinin karışık tamsayı eniyileme problemi olarak formüle edilebileceği gösterilmiştir. Esneklik analizinde ortaya çıkan max-min-max probleminin kesin çözümü için yeni bir matematiksel formülasyon geliştirilmiştir. Geliştirilen formülasyonun ana fikrini

esneklik analizinin, esnekliği sınırlarken potansiyel olarak aktif hale gelebilen kısıtlamalar alanında yapılabileceği oluşturmuştur. Bu formölasyon esneklik için aktif ve sınırlayıcı kısıtlama sayısının kontrol değişkeni sayısının bir fazlasına eşit olacağına ve aktif değişkenlerde doğrusal bağımsızlık bulunacağına dayanmaktadır.

Pistikopoulos and Grossmann (1989) tarafından ısı değiştirici ağlarının yeniden tasarımı (retrofit tasarımı) için yatırım maliyeti ve sistemin esnekliğinin artırılmasıyla meydana gelmesi beklenen gelir arasındaki ekonomik ödünleşmeyi gösteren problem doğrusal olmayan modellerle tanımlanmıştır. Yatırım maliyeti ile esneklik arasındaki ödünleşmeyi gösteren eğrinin oluşturulması için sistematik bir yöntem önerilmiştir. Daha sonra belirlenmiş esneklik derecesi ile yeniden tasarım sayısı arasında umulan ençok geliri değerlendiren stokastik bir eniyileme methodu sunulmuştur. Bu method yeniden tasarım aşamasında beklenen faydanın ençoklanması için esneklik seviyesinin belirlenmesini sağlamaktadır.

Papalexandri and Pistikopoulos (1993) tarafından ısı değiştirici ağlarının esnekliklerini artırmak amacıyla yeniden tasarımları için doğrusal olmayan bir karışık tamsayı programlama modeli geliştirilmiştir. Sıcak ve soğuk akımların besleme sıcaklıklarının, debilerinin ve ısı transfer katsayılarının belirlenmiş oranlarda değişmesine izin verilmiştir. Ağın esnekliğini sınırlayan kritik işletme koşullarına dayalı çok periyotlu hiperyapılı bir ısı değiştirici ağı sunulmuştur. Sunulan çok periyotlu hiperyapı muhtemel bütün ağ biçimlerini kapsamaktadır. Yeni akım karışılaşmaları, yeniden ısı değiştirici atamaları, akım bölünmeleri ve akımların karışması gibi yapısal değişiklikler açık bir şekilde modellenmiştir. Enerji geri kazanımı ve ısı değiştirici tüketimleri önceden belirlenmemiş fakat toplam yıllık maliyetin bir parçası olarak yapısal değişiklik maliyetiyle birlikte amaç fonksiyonunda eniyilenmiştir. Bu şekilde ısı değiştirici ağının esnekliğini arttırmak için işletme ve yeniden tasarım maliyeti arasındaki ekonomik ödünleşmeler açıklanmıştır.

Konukman *et. al.* (1995) esnek ısı değiştirici ağ yapılarının yatırım maliyetlerini enazlamak, ısı değiştirici alanlarını ve yangeçit (bypass) oranlarını bulmak için yeni bir yöntem önermişlerdir. Oluşturdukları yapının aynı anda önceden belirlenmiş miktarda her yönde besleme akım sıcaklıklarında meydana gelebilecek

değişimler altında çalışabileceğini göstermişlerdir. Isı değiştirici ağlarının enerji dengesi eşitliklerini, ısı yükü ve yaklaşım sıcaklığı eşitsizliklerini giriş akımlarında her yönde olabilecek bozucu etkiler için kullanmışlardır.

Bahri *et. al.* (1997) esnek ve denetlenebilir proseslerin sentezi üzerine çalışmışlardır. Yöntemleri, tasarımcıya değişik proses yapılarını ve kontrol sistemlerini sistematik bir şekilde değerlendirmek ve tasarımı kontrol edilebilmek için nicel ölçütler sağlamıştır. Algoritmasının her iterasyonunda iki kademe bulunan, dinamik, doğrusal olmayan, karışık tamsayı programlama modeli sunulmuştur. Bu şekilde hem nominal çalışma koşulları için, hem de besleme akımlarında bozucu etki olduğu durumlar için çeşitli kontrol planları oluşturulmuştur.

Konukman *et. al.* (1999) tarafından minimum işletme maliyetli esnek ısı değiştirici ağ yapılarının sentezi tek kademeli, iteratif olmayan, süperyapıya dayalı MILP formülasyonu ile yapılmıştır. Besleme akım sıcaklıkları kesin olmayan parametreler olarak değerlendirilmiştir. Bu yöntemle ısı değiştirici ağı sentez probleminin standart tanımını, esneklik indeksini de içine alacak şekilde geliştirmişlerdir. Toplam işletme maliyeti ile esneklik indeksi arasındaki ilişkiyi bir örnek üzerinde göstermişlerdir.

3. ‘AŞAĞI AKIM PATİKALARI’ YÖNTEMİ VE ESNEKLİK İNDEKSİ KAVRAMI

Bu bölümde Kotjabasakis and Linnhoff’un (1986) daha esnek ısı değiştirici ağ yapılarına ulaşmak için geliştirdikleri ‘Aşağı Akım Patikaları’ yöntemi pinch çözümü yapılmış örnek bir ısı değiştirici ağ problemi üzerinde açıklanmış, Swaney and Grossmann (1985) ve Grossmann and Floudas’ın (1985, 1987) kimyasal süreçlerin esneklikleri ve esneklik indeksi üzerine geliştirdikleri genel formülasyon verilmiş ve bu formülasyon üzerinden Kotjabasakis and Linnhoff’un (1986) örnek ısı değiştirici ağ problemi değerlendirilmiştir.

3.1 ‘Aşağı Akım Patikaları’ Yöntemi

Kotjabasakis and Linnhoff (1986) matematiksel işlemler yapmadan daha esnek ısı değiştirici ağ yapılarına ulaşmak için ‘Aşağı Akım Patikaları’ yöntemini geliştirmişlerdir. Bu yöntemi besleme akım sıcaklıkları ve besleme akım miktarı gibi değişebilen parametrelerin, çıkış sıcaklıkları gibi hedef büyüklükleri üzerindeki etkilerini belirlemek için kullanmışlardır. Bu etkileri ortadan kaldırmak veya azaltmak için henüz yapısal tasarım aşamasında iken değişiklikler önermişlerdir.

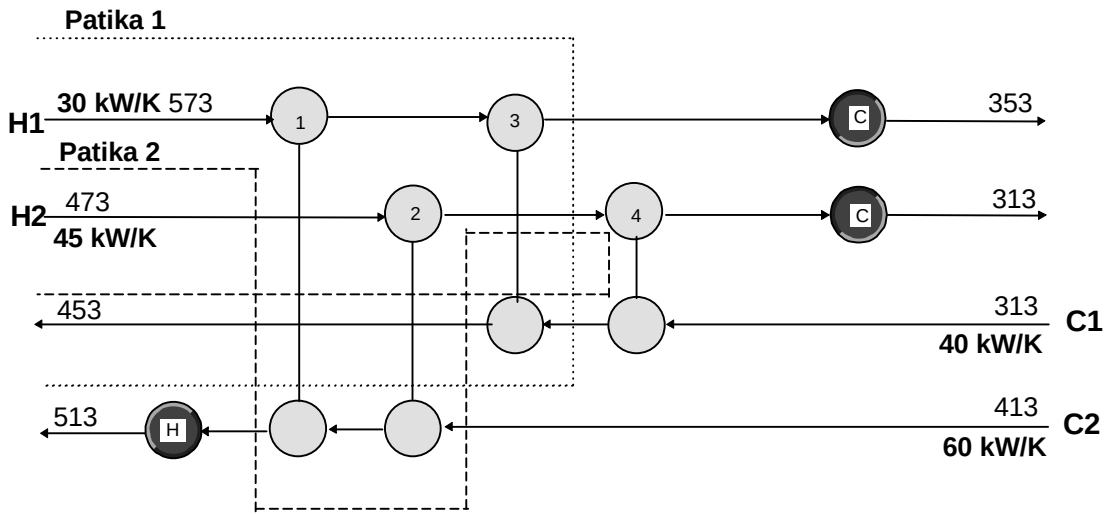
Herhangi bir matematiksel çözüm yapmadan aşağıdaki iki soruya cevap aramışlardır.

1. Kaynak akımları üzerinde olabilecek değişimler çıkış sıcaklıklarını etkiler mi ?
2. Bu etkileri ortadan kaldırmak için ne gibi yapısal değişiklikler yapılabilir ?

Tablo 3.1’de tanımlanan örnek IDA probleminin pinch çözümü Şekil 3.1’de verildiği gibidir.

Tablo 3.1 Kotjabasakis and Linnhoff'un (1986) Örnek Isı Değiştirici Ağ Probleminin Tanımı

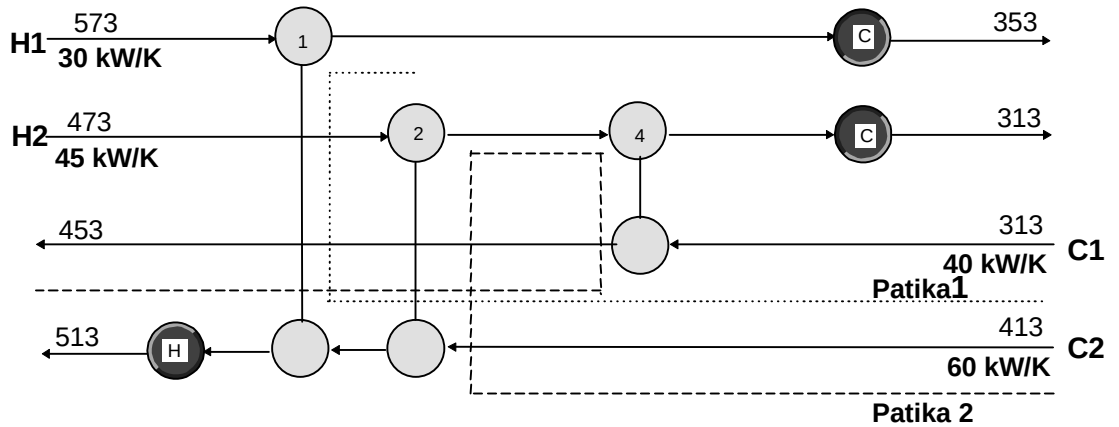
AKIMLAR	HCF (kW/K)	Tgiriş (K)	Tçıkış (K)
Sıcak Akım 1 (H1)	10	650	370
Sıcak Akım 2 (H2)	20	590	370
Soğuk Akım 1 (C1)	15	410	650
Soğuk Akım 2 (C2)	13	350	500
BUHAR	-	680	680
SOĞUTMA SUYU	-	300	320



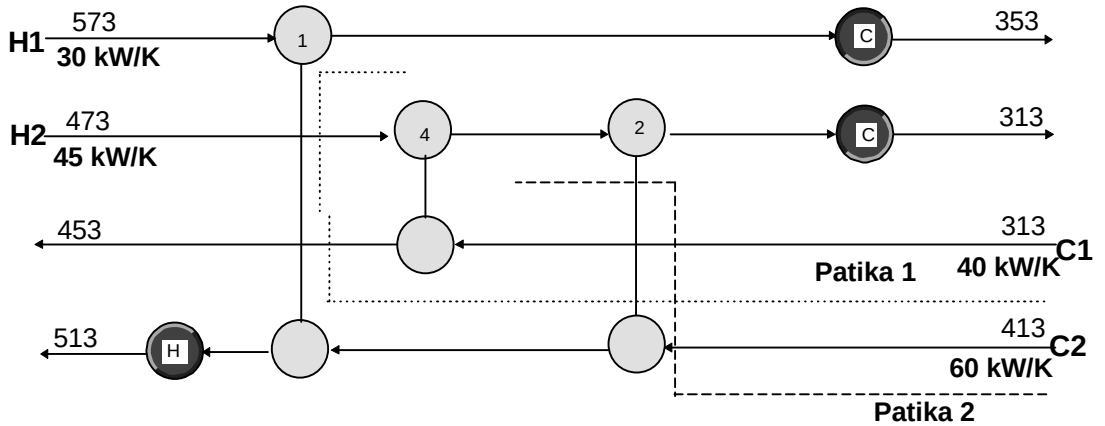
Şekil 3.1 H1 Akımının C1 Akımı Üzerine Etki Patikaları

Şekil 3.1’de görüldüğü gibi C1 akımı dışındaki bütün akım kaynakları hedef sıcaklıklarını kontrol edebilecek ısıtıcı ve soğutuculara sahiptir. Dolayısıyla C1 akımının çıkış sıcaklığını sabit tutmayı amaçlamışlardır. H1 akımının giriş sıcaklığındaki değişimin C1 akımı üzerindeki etkisi incelendiğinde bunun iki patika üzerinden gerçekleşebileceği görülmektedir. Herhangi bir akımın besleme sıcaklığında meydana gelebilecek değişimin başka bir akımın hedef sıcaklığını

İlk olarak C2 akımının kaynak akımında meydana gelebilecek değişimin C1 akımının hedef sıcaklığı üzerindeki etkisini kaldırmak için değişimi taşıyan patikaların bozulması düşünülmüştür. C2 akımının kaynak sıcaklığında meydana gelebilecek değişim C2 akımı ve birinci ısı değiştirici üzerinden H1 akımını, daha sonra H1 akımı ve üçüncü ısı değiştirici üzerinden C1 akımını etkileyebilmektedir. Kalan ısı değiştiricilerin ısı yükleri ve yaklaşım sıcaklıkları yeterli olursa üçüncü ısı değiştiricinin kaldırılması birinci patikayı bozacaktır. Şekil 3.3 birinci patikanın bozulduğu yapıyı göstermektedir.



Şekil 3.3 Üçüncü Isı Değiştiricinin Kaldırıldığı Ağ Yapısı



Şekil 3.4 İkinci ve Dördüncü Isı Değiştiricinin Yer Değiştirdiği Ağ Yapısı

İkinci olarak tamamen aşağı akım olan patikayı yukarı akım patikası haline getirmeyi düşünmüşlerdir. Şekil 3.2’de görüldüğü üzere C2 akımının kaynak sıcaklığı üzerindeki değişim C2 akımı, ikinci ısı değiştirici, H2 akımı ve dördüncü ısı değiştirici üzerinden C1 akımının hedef sıcaklığını etkileyebilmektedir. Patika

tamamen aşağı akımdır. Şekil 3.4’de görüldüğü gibi ikinci ve dördüncü ısı değiştiricilerin yer değiştirmesi ile patika H2 akımı üzerinde yukarı akım patikaya dönüştürülmüştür. Şekil 3.4 incelendiğinde C2 akımının C1 akımı üzerindeki etkisinin tamamen ortadan kalktığı görülmektedir.

Kotjabasakis and Linnhoff (1986) yukarıdaki yapısal değişiklikleri daha esnek ısı değiştirici ağ yapılarına ulaşmak için önermişlerdir. Yöntemlerinde bir akım kaynağında meydana gelebilecek değişimlerin diğer bir akımın hedef büyüklükleri üzerindeki etkilerini araştırmışlar ve bu etkileri ortadan kaldırmaya çalışmışlardır.

3.2 Esneklik İndeksi

Swaney and Grossmann (1985) ve Grossmann and Floudas (1985, 1987) kimyasal süreçlerin esnekliklerinde doğrusal problemler için aktif kısıtlama stratejisini de içine alan algoritmalar geliştirmişlerdir. Geliştirdikleri algoritmalar her bir verteks yönü için doğrusal(olmayan) programlama çözümü gerektirmektedir. Oluşturdıkları formülasyon aşağıda gösterildiği gibidir.

$$s^{I^*}(\theta^I) = \max_{u,v,z} s^I \quad (3.1)$$

(A1) Bütün ısı değiştiriciler, ısıtıcılar ve akım bölünmeleri için enerji dengeleri:

$$A(u, v)t^s + B(u, v, w) = b \quad (3.2)$$

(A2) İstenilen enerji geri kazanımı:

$$\sum_k l_k^H = \alpha H(t^s, w) \quad (3.3)$$

(B1) Bütün ısı değiştiriciler için yaklaşım sıcaklığı kısıtlamaları:

$$C(u, w)t^s + D(u, v, w)v + p \leq 0 \quad (3.4)$$

(B2) Negatif olmayan ısı değıştirici ve soğutucu yükleri:

$$E(u, w)t^s + Gv + r \leq 0 \quad (3.5)$$

(B3) Negatif olmayan ısıtıcı yükleri :

$$-l^H \leq 0 \quad (3.6)$$

(B4) Belirsizlik yönleri:

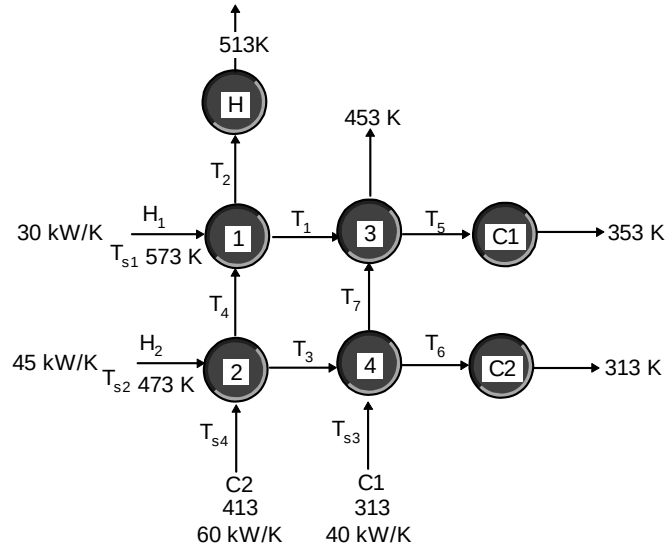
$$\theta = \theta^n + s^l \theta^l \quad (3.7)$$

$$\theta^1 = \begin{bmatrix} \theta_1^L \\ \theta_2^L \\ \cdot \\ \cdot \\ \theta_{n_u-1}^L \\ \theta_{n_u}^L \end{bmatrix} - \theta^N, \theta^2 = \begin{bmatrix} \theta_1^L \\ \theta_2^L \\ \cdot \\ \cdot \\ \theta_{n_u-1}^L \\ \theta_{n_u}^L \end{bmatrix} - \theta^N, \dots, \theta^{2^{n_u}} = \begin{bmatrix} \theta_1^L \\ \theta_2^L \\ \cdot \\ \cdot \\ \theta_{n_u-1}^L \\ \theta_{n_u}^L \end{bmatrix} - \theta^N$$

3.3 Problemin Esneklik İndekslerinin Hesaplanması

Aşağıda Kotjabasakis and Linnhoff'un (1986) inceledikleri örnek problem için bütün akımların kaynak sıcaklıklarında meydana gelebilecek değışimler incelenmiş, Swaney and Grossmann (1985b) ve Grossmann and Floudas'ın (1985, 1987) geliştirdikleri formülasyon üzerinden doğrusal programlama ile çözümler yapılmış, önerilen yapıların esneklikleri hesaplanmıştır.

Şekil 3.5 Kotjabasakis and Linnhoff'un (1986) inceledikleri örnek problemin pinch çözümünü göstermektedir. Aşağıda bu yapı üzerinden ısı değıştirici eşitlikleri, ısı yükü ve yaklaşım sıcaklığı eşitsizlikleri yazılmıştır. Besleme akım sıcaklıklarında her yönde olabilecek değışimler için yapının dayanabileceği maksimum esneklikler hesaplanmış ve değerler Tablo 3.1'de gösterilmiştir.



Şekil 3.5 Kotjabasakis and Linnhoff'un (1986) İnceledikleri Örnek Problemin Pinch Çözümü

Maximize δ

Isı değıştiricilerin enerji dengeleri:

$$\text{ID1} \quad : \quad 30(T_{s1} - T_1) + 60(T_4 - T_2) = 0 \quad (3.8)$$

$$\text{ID2} \quad : \quad 45(T_{s2} - T_3) + 60(T_{s4} - T_4) = 0 \quad (3.9)$$

$$\text{ID3} \quad : \quad 30(T_1 - T_5) + 40(T_7 - 453) = 0 \quad (3.10)$$

$$\text{ID4} \quad : \quad 45(T_3 - T_6) + 40(T_{s3} - T_7) = 0 \quad (3.11)$$

Isı değıştiricilerin ısı yükü kısıtlamaları:

$$\text{ID1} \quad : \quad T_1 - T_{s1} \leq 0, \quad T_4 - T_2 \leq 0 \quad (3.12)$$

$$\text{ID2} \quad : \quad T_3 - T_{s2} \leq 0, \quad T_{s4} - T_4 \leq 0 \quad (3.13)$$

$$\text{ID3} \quad : T_5 - T_1 \leq 0, \quad T_7 - 453 \leq 0 \quad (3.14)$$

$$\text{ID4} \quad : T_6 - T_3 \leq 0, \quad T_{S3} - T_7 \leq 0 \quad (3.15)$$

$$\text{Isıtıcı(1)} \quad : T_5 \geq 353 \quad (3.16)$$

$$\text{Isıtıcı(2)} \quad : T_6 \geq 313 \quad (3.17)$$

$$\text{Soğutucu(1)} \quad : T_2 \leq 513 \quad (3.18)$$

Isı değıştiricilerin yaklaşım sıcaklığı (ΔT_m) kısıtlamaları :

$$\text{ID1} \quad : T_2 - T_{S1} \leq 0, \quad T_4 - T_1 \leq 0 \quad (3.19)$$

$$\text{ID2} \quad : T_4 - T_{S2} \leq 0, \quad T_{S4} - T_3 \leq 0 \quad (3.20)$$

$$\text{ID3} \quad : 453 - T_1 \leq 0, \quad T_7 - T_5 \leq 0 \quad (3.21)$$

$$\text{ID4} \quad : T_7 - T_3 \leq 0, \quad T_{S3} - T_6 \leq 0 \quad (3.22)$$

$$\begin{bmatrix} T_{S1} \\ T_{S2} \\ T_{S3} \\ T_{S4} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 573 \\ 473 \\ 313 \\ 413 \end{bmatrix} + \theta_n \delta, \quad \theta_1 = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix}, \quad \dots, \theta_{16} = \begin{bmatrix} -1 \\ -1 \\ -1 \\ -1 \end{bmatrix} \quad (3.23)$$

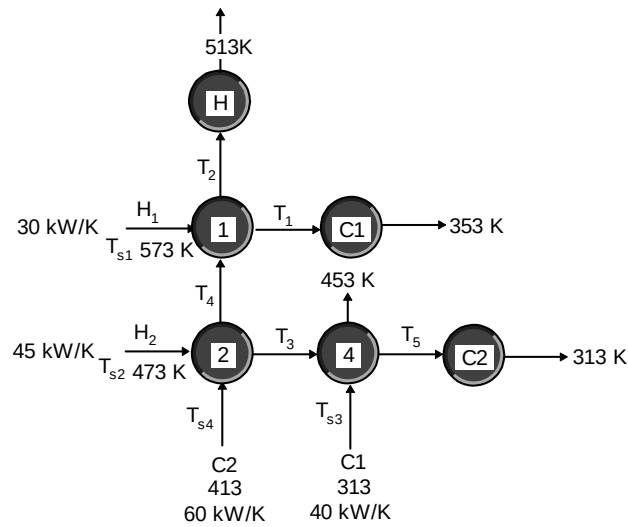
Tablo 3.2 incelendiğinde her yönde hesaplanmış ençok esneklikler (δ) içinde minimum olan 30 K'in bu yapının esneklik indeksi (δ^*) olduğu görülmektedir.

Tablo 3.2 Şekil 3.5'deki Yapı İçin Ençok Esneklik Değerleri

Bozucu Etki Yönü $T_{S1}, T_{S2}, T_{S3}, T_{S4}$	Ençok Esneklik, $\delta, (K)$	Bozucu Etki Yönü $T_{S1}, T_{S2}, T_{S3}, T_{S4}$	Ençok Esneklik, $\delta, (K)$
+ + + +	100	- + + +	80
+ + + -	140	- + + -	120
+ + - +	100	- + - +	80
+ + - -	∞	- + - -	120
+ - + +	30	- - + +	30
+ - + -	80	- - + -	80
+ - - +	30	- - - +	30
+ - - -	149.1	- - - -	71.3

Esneklik İndeksi (δ^*)	30 K
---------------------------------	-------------

Şekil 3.6 üçüncü ısı değiştiricinin kaldırıldığı yapıyı göstermektedir. Aşağıda bu yapı üzerinden ısı değiştirici eşitlikleri, ısı yükü ve yaklaşım sıcaklığı eşitsizlikleri yazılmıştır. Besleme akım sıcaklıklarında her yönde olabilecek değişimler için yapının dayanabileceği maksimum esneklikler hesaplanmış ve değerler Tablo 3.2'de gösterilmiştir.



Şekil 3.6 Üçüncü Isı Değiştiricinin Kaldırıldığı Yapı

Maximize δ

Isı değiştiricilerin enerji dengeleri:

$$\text{ID1} \quad : \quad 30(T_{S1} - T_1) + 60(T_4 - T_2) = 0 \quad (3.24)$$

$$\text{ID2} \quad : \quad 45(T_{S2} - T_3) + 60(T_{S4} - T_4) = 0 \quad (3.25)$$

$$\text{ID3} \quad : \quad 45(T_3 - T_5) + 40(T_{S3} - 453) = 0 \quad (3.26)$$

Isı değiştiricilerin ısı yükü kısıtlamaları:

$$\text{ID1} \quad : \quad T_1 - T_{S1} \leq 0, \quad T_4 - T_2 \leq 0 \quad (3.27)$$

$$\text{ID2} \quad : \quad T_3 - T_{S2} \leq 0, \quad T_{S4} - T_4 \leq 0 \quad (3.28)$$

$$\text{ID3} \quad : \quad T_5 - T_3 \leq 0, \quad T_{S3} - 453 \leq 0 \quad (3.29)$$

$$\text{Isıtıcı(1)} \quad : \quad T_1 \geq 353 \quad (3.30)$$

$$\text{Isıtıcı(2)} \quad : \quad T_5 \geq 313 \quad (3.31)$$

$$\text{Soğutucu(2)} \quad : \quad T_2 \leq 513 \quad (3.32)$$

Isı değiştiricilerin yaklaşım sıcaklığı (ΔT_m) kısıtlamaları :

$$\text{ID1} \quad : \quad T_2 - T_{S1} \leq 0, \quad T_4 - T_1 \leq 0 \quad (3.33)$$

$$\text{ID2} \quad : \quad T_4 - T_{S2} \leq 0, \quad T_{S4} - T_3 \leq 0 \quad (3.34)$$

$$\text{ID3} \quad : \quad 453 - T_3 \leq 0, \quad T_{S3} - T_5 \leq 0 \quad (3.35)$$

$$\begin{bmatrix} T_{S1} \\ T_{S2} \\ T_{S3} \\ T_{S4} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 573 \\ 473 \\ 313 \\ 413 \end{bmatrix} + \theta_n \delta, \quad \theta_1 = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix}, \quad \dots, \quad \theta_{16} = \begin{bmatrix} -1 \\ -1 \\ -1 \\ -1 \end{bmatrix} \quad (3.36)$$

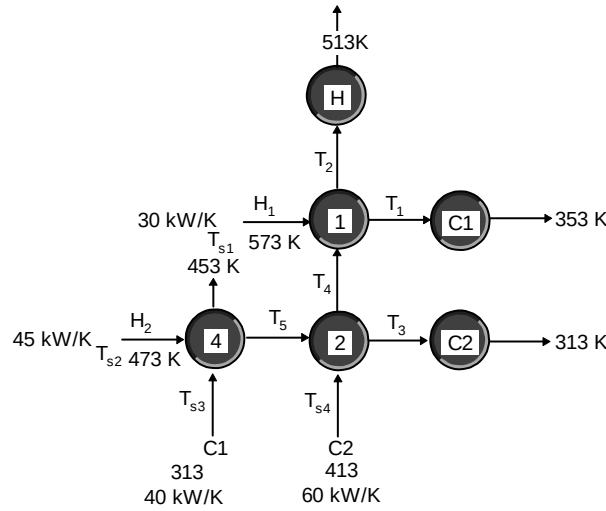
Tablo 3.3 incelendiğinde her yönde hesaplanan ençok esneklikler (δ) içinde minimum olan 18.18 K değerinin Şekil 3.6'daki yapının esneklik indeksi (δ^*) olduğu görülmektedir.

Tablo 3.3 Şekil 3.6'daki Yapının Ençok Esneklik Değerleri

Bozucu Etki Yönü $T_{S1}, T_{S2}, T_{S3}, T_{S4}$	Ençok Esneklik, $\delta, (K)$	Bozucu Etki Yönü $T_{S1}, T_{S2}, T_{S3}, T_{S4}$	Ençok Esneklik, $\delta, (K)$
+ + + +	100	- + + +	80
+ + + -	140	- + + -	140
+ + - +	100	- + - +	80
+ + - -	∞	- + - -	220
+ - + +	20	- - + +	20
+ - + -	20	- - + -	20
+ - - +	18.82	- - - +	18.82
+ - - -	18.82	- - - -	18.82

Esneklik İndeksi (δ^*)	18.82 K
---------------------------------	----------------

Şekil 3.7 incelendiğinde C2 akımının kaynak sıcaklıklarında olabilecek değişimlerin C1 akımının hedef sıcaklığı üzerine etkisinin olmayacağı görülmektedir. Fakat ikinci ısı değiştirici için H2 ve C2 akımlarının giriş sıcaklıkları incelendiğinde sırasıyla 348.6 K ve 413 K olduğu görülmektedir. Sıcak akımın giriş sıcaklığı soğuk akımın giriş sıcaklığından küçüktür. Böyle bir ısı değiştirici ağ yapısının çalışmayacağı görülmektedir.

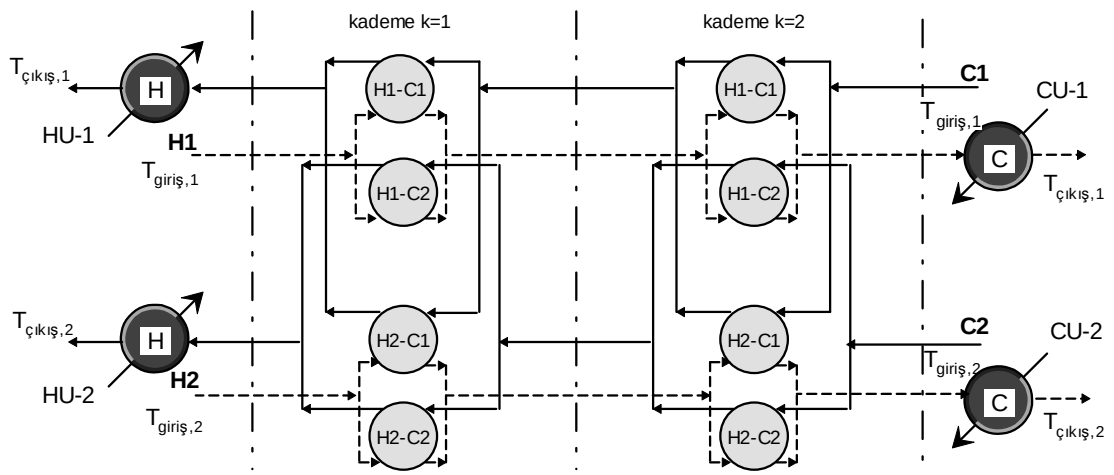


Şekil 3.7 İkinci ve Dördüncü Isı Değiştiricilerin Yer Değiştirdiği Yapı

Kotjabasakis and Linnhoff (1986) ‘Aşağı Akım Patikaları’ yöntemini daha esnek ısı değiştirici ağ yapılarına ulaşmak için geliştirmişlerdir. Yöntemlerinde herhangi bir besleme akımının giriş değerlerinde olabilecek değişimlerin (giriş sıcaklıkları, giriş akım debileri) başka bir akımın hedef sıcaklıkları üzerindeki etkilerini matematiksel çözümler yapmadan tespit etmeye ve bu etkileri ortadan kaldırmaya çalışmışlardır. Buldukları yapıların besleme akım kaynaklarında her yönde olabilecek değişimler için en çok esneklik miktarları ve esneklik indekleri bulunmuştur. Kotjabasakis and Linnhoff (1986), inceledikleri örnek problem için C2 akımının giriş sıcaklıklarında olabilecek değişimlerin C1 akımının hedef sıcaklığı üzerindeki etkilerini ortadan kaldırmak için yapısal değişiklikler yapmışlardır. Matematiksel çözüm yapmadan bulunan yapıların esnekliklerinin düştüğü ve son olarak bulunan yapının çalışamayacağı bulunmuştur.

4. SÜPERYAPI TABANLI KARIŞIK TAMSAYI DOĞRUSAL OLMAYAN PROGRAMLAMA FORMÜLASYONU İLE ISI DEĞİŞTİRİCİ AĞI SENTEZİ

Bu bölümde Yee and Grossmann (1990) tarafından geliştirilen aynı anda ısı değiştirici alanlarını, sıcak/soğuk akım karşılaşması seçimlerini ve ütilite maliyetlerini enazlayan süperyapı ve süperyapı formülasyonu açıklanmaktadır. Önerilen süperyapı iki kademe, iki sıcak ve iki soğuk akım için Şekil 4.1’de gösterildiği gibidir.



Şekil 4.1 Yee and Grossmann'ın iki kademeli süperyapısı

Şekil 4.1 incelendiğinde her iki kademede muhtemel tüm sıcak ve soğuk akım karşılaşmalarının olduğu dörder tane ısı değiştirici bulunduğu görülmektedir. Kademelere giren akımlar bölünmekte ve bir ısı değiştiriciye yönelmektedir. Kademe içinde ısı değiştirici çıkışlarında akımlar birleşmekte ve bir sonraki kademeye geçmektedir. Süperyapı akımlar arasında daha sonraki kademelerde de karşılaşmalara olanak sağlamaktadır. Isıtıcı ve soğutucular her akım için kademelerin dışına yerleştirilmiştir. Bu MINLP modeli enaz yıllık maliyetli ısı değiştirici ağı tasarımı süperyapı içinde hangi ısı değiştiricilerin olacağını ikili değişkenler ile tespit ederek yapmaktadır. Akımların gösterilmesinde sıcak akımlar için i , soğuk

akımlar için j indisleri kullanılmıştır. Süperyapı içindeki kademeler ise k ile gösterilmiştir. Yapılan tanımların ışığı altında aşağıdaki formülasyon oluşturulmuştur (Yee and Grossmann,1990).

Amaç fonksiyonu:

Amaç fonksiyonu ağın yıllık toplam maliyeti olarak tanımlanabilir. Yıllık toplam maliyet ütilite maliyetleri, her ısı değiştirici için alan maliyetleri ve ısı değiştiricilerin sabit masraflarından oluşmaktadır.

$$\begin{aligned}
 & \text{Min} \sum_{i \in HP} CCU \ qcu_i + \sum_{j \in CP} CHU \ qhu_j + \sum_{i \in HP} \sum_{j \in CP} \sum_{k \in ST} CF_{ij} \ z_{ijk} + \sum_{i \in HP} CF_{i,CU} \ zcu_i \\
 & + \sum_{j \in CP} CF_{HU,j} \ zhu_j + \sum_{i \in HP} \sum_{j \in CP} \sum_{k \in ST} C_{ij} \left[q_{ijk} / \left(U_{ij} \left[(dt_{ijk})(dt_{ijk+1})(dt_{ijk} + dt_{ijk+1}) / 2 \right]^{1/3} \right) \right]^{B_{ij}} + \\
 & \sum_{i \in HP} C_{i,CU} \left[qcu_i / \left(U_{i,CU} \left[(dteu_i)(TOUT_i - TIN_{CU})(dteu_i + (TOUT_i - TIN_{CU}))^{1/2} \right]^{1/3} \right) \right]^{B_{i,CU}} \\
 & + \sum_{j \in HP} C_{j,HU} \left[qhu_j / \left(U_{j,HU} \left[(dthu_j)(TIN_{HU} - TOUT_j)(dthu_j + (TIN_{HU} - TOUT_j))^{1/2} \right]^{1/3} \right) \right]^{B_{j,HU}}
 \end{aligned} \tag{4.1}$$

Her akım için genel enerji dengesi:

Bu kısıtlamalar herhangi bir akımın istenilen hedef sıcaklığına ulaşması için gerekli olan enerjinin, akımın diğer akımlarla, ısıtıcı ve soğutucularla yaptığı toplam ısı transferine eşit olması için konulmuştur.

$$(TIN_i - TOUT_i)F_i = \sum_{k \in ST} \sum_{j \in CP} q_{ijk} + qcu_i \quad i \in HP \tag{4.2}$$

$$(TOUT_j - TIN_j)F_j = \sum_{k \in ST} \sum_{i \in HP} q_{ijk} + qhu_j \quad j \in CP \tag{4.3}$$

Her kademede enerji dengesi:

Süperyapıya giren akımlar için her kademede enerji dengesi yazılmalıdır.

$$(t_{i,k} - t_{i,k+1})F_i = \sum_{j \in CP} q_{ijk} \quad k \in ST, i \in HP \quad (4.4)$$

$$(t_{j,k} - t_{j,k+1})F_j = \sum_{i \in HP} q_{ijk} \quad k \in ST, j \in CP \quad (4.5)$$

Süperyapı giriş sıcaklıklarının atanması:

Besleme akım sıcaklıkları da süperyapıya giriş sıcaklığı olarak atanmalıdır. Süperyapıda k=1 sıcak akımlar için, k=3 ise soğuk akımlar için giriş bölgesidir.

$$TIN_i = t_{i,1} \quad i \in HP \quad (4.6)$$

$$TIN_j = t_{j,NOK+1} \quad j \in CP \quad (4.7)$$

Sıcaklık olurlulukları:

Süperyapı içinde birbirini takip eden kademeler boyunca akımların sıcaklıkları düşmekte veya sabit kalmaktadır. Süperyapıdan çıktıklarında hedef sıcaklıklarına ulaşmayan akımlar yapının dışında bulunan ısıtıcılar ve soğutucular sayesinde hedef sıcaklıklarına ulaşmaktadır.

$$t_{i,k} \geq t_{i,k+1} \quad k \in ST, i \in HP \quad (4.8)$$

$$t_{j,k} \geq t_{j,k+1} \quad k \in ST, j \in CP \quad (4.9)$$

$$TOUT_i \leq t_{i,NOK+1} \quad i \in HP \quad (4.10)$$

$$TOUT_j \geq t_{j,1} \quad j \in CP \quad (4.11)$$

Isıtıcı ve soğutucu yükleri:

Sıcak akımların süperyapıdan çıktıkları ve hedef sıcaklığa ulaştıklarındaki enerji farkı ısıtıcıdan alınan enerjiye, soğuk akımların süperyapıdan çıktıkları ve hedef sıcaklığa ulaştıklarındaki enerji farkı ise soğutucuya verilen enerjiye eşit olmalıdır.

$$(t_{i,NOK+1} - TOUT_i)F_i = qcu_i \quad i \in HP \quad (4.12)$$

$$(TOUT_j - t_{j,1})F_j = qhu_j \quad j \in CP \quad (4.13)$$

Mantıksal kısıtlamalar:

Mantıksal kısıtlamalar ve ikili değişkenler sistem içinde ısı değiştiricilerden, ısıtıcılardan ve soğutuculardan hangilerinin bulunacağını belirlemek için gereklidir. İkili değişkenler ısı değiştiriciler için $z_{i,j,k}$, soğutucular için zcu_i ve ısıtıcılar için zhu_j şeklinde gösterilmiştir.

$$q_{ijk} - \Omega z_{ijk} \leq 0 \quad k \in ST, i \in HP, j \in CP \quad (4.14)$$

$$qcu_i - \Omega zcu_i \leq 0 \quad i \in HP \quad (4.15)$$

$$qhu_j - \Omega zhu_j \leq 0 \quad j \in CP \quad (4.16)$$

$$z_{ijk}, zcu_i, zhu_j = 0,1$$

Yaklaşım sıcaklığı tanımlamaları:

Akımlar arasındaki yaklaşım sıcaklığı (ΔT_m) ısı değiştirici ağı içinde bulunan ünitelerin alan hesaplamaları için gereklidir. İkili değişkenler, yaklaşım sıcaklıkları için aşağıdaki kısıtlamaların bulunup bulunmayacağını belirlemektedir.

$$dt_{ijk} \leq t_{j,k} - t_{j,k} + \Gamma(1 - z_{ijk}) \quad k \in ST, i \in HP, j \in CP \quad (4.17)$$

$$dt_{i,j,k+1} \leq t_{j,k+1} - t_{j,k+1} + \Gamma(1 - z_{ijk}) \quad k \in ST, i \in HP, j \in CP \quad (4.18)$$

$$dtcu_i \leq t_{i,NOK+1} - T_{CU}^{out} + \Gamma(1 - z_{ijk}) \quad i \in HP \quad (4.19)$$

$$dthu_j \leq T_{HU}^{out} - t_{j,1} + \Gamma(1 - z_{ijk}) \quad j \in CP \quad (4.20)$$

Herhangi bir ısı değiştiricinin giriş ve çıkışlarında sıcak ve soğuk akımlar arasındaki yaklaşım sıcaklığının enaz ne kadar olabileceği belirtilebilir.

$$dt_{ijk} \geq \Delta T_{\min} \quad (4.21)$$

Yee and Grossmann (1990) tarafından geliştirilen süperyapı ve bu süperyapı üzerinden yazılan karışık tamsayı doğrusal olmayan programlama formülasyon aynı anda ısı değiştirici alanlarını, sıcak/soğuk akım karşılaşması seçimlerini ve ütilite maliyetlerini enazlamaktadır.

5. ESNEKLİK İNDEKSİNİ İÇİNE ALAN SÜPERYAPI FORMÜLASYONU

Bu çalışmada, istenilen esneklik hedefi için minimum işletme maliyetli ısı değiştirici ağlarının sentezi tek basamaklı, iteratif olmayan, süperyapı tabanlı bir MILP formülasyonu ile sağlanmıştır. Besleme akım sıcaklıklarında olabilecek istenilen miktarda değişim altında çalışabilecek yapının doğrusal kısıtlamalarına $\mathbf{n}$ şeklinde tanımlanan bir indeks eklenmiştir. $\mathbf{n}_H$ tane sıcak akımlı, $\mathbf{n}_C$ tane soğuk akımlı ısı değiştirici ağ yapısı problemi için toplam $2^{n_H+n_C}$ tane bozucu etki yönü vardır. Nominal çalışma şartları $\mathbf{n}=\mathbf{0}$ şeklinde gösterilmiştir.

Süperyapılı ısı değiştirici ağ yapısı ve esnekliği ile ilgili genel MINLP formülasyonu Denklem 5.1’de tanımlanmıştır. $\mathbf{d}$ dizayn değişkenleri vektörünü (ısı değiştirici alanları), $\mathbf{u}$ serbest değişkenler vektörünü (ısıtıcı, soğutucu yükleri), $\mathbf{x}$ durum değişkenleri vektörünü (çıkış sıcaklıkları), $\mathbf{z}$ ikili değişkenler vektörünü, $\mathbf{p}$ sabitlenmiş parametreler vektörünü ve $\boldsymbol{\theta}$ belirsizlik parametreleri vektörünü (besleme akım sıcaklıkları) göstermektedir.

$$\underset{\mathbf{d}, \mathbf{x}, \mathbf{u}, \mathbf{z}}{\text{Min}} \quad \phi(\mathbf{d}, \mathbf{x}, \mathbf{u}, \mathbf{z}, \mathbf{p}, \boldsymbol{\theta}) \quad (5.1a)$$

$$\text{st: } h(\mathbf{d}, \mathbf{x}, \mathbf{u}, \mathbf{z}, \mathbf{p}, \boldsymbol{\theta}) = 0 \quad (5.1b)$$

$$g(\mathbf{d}, \mathbf{x}, \mathbf{u}, \mathbf{z}, \mathbf{p}, \boldsymbol{\theta}) \leq 0 \quad (5.1c)$$

$$\boldsymbol{\theta} \in R(\boldsymbol{\delta}) = \{ \boldsymbol{\theta} \mid (\boldsymbol{\theta}^0 - \boldsymbol{\delta} \Delta \boldsymbol{\theta}^-) \leq \boldsymbol{\theta} \leq (\boldsymbol{\theta}^0 + \boldsymbol{\delta} \Delta \boldsymbol{\theta}^+) \} \quad (5.1d)$$

Denklem 5.1a toplam yıllık maliyet ya da toplam işletme maliyeti cinsinden formüle edilebilen amaç fonksiyonudur. Sentez problemi için $\mathbf{d}$ vektörü karar değişkenleri içinden çıkarılmalıdır. Denklem (5.1b-5.1c) sırasıyla eşitlik ve eşitsizlik kısıtlamalarıdır. Eğer durum vektörü, $\mathbf{x}$, Denklem 5.1b kullanılarak ortadan kaldırılırsa Denk 5.1c azaltılmış eşitsizlik vektörü olarak yazılabilir.

Denklem 5.1d normal çalışma şartlarında kesin olmayan parametrelerin (θ) değişim miktarını göstermektedir. $\Delta\theta^-$ ve $\Delta\theta^+$ normal çalışma şartlarından artma ve azalma yönünde değişim miktarlarıdır.

$R(\delta)$ alanı Denklem (5.1b-5.1c) ile tanımlanan olurlu bölge içerisinde olması gereken hiperdikdörtgeni tanımlamaktadır. Sabitlenmiş ısı değiştirici topolojisi ve tasarımı için esneklik indeksi skalar δ 'ın maksimumu olarak tanımlanmıştır. Bu problemi Denklem 5.1d içerisinde max-min-max tahdidi olduğu için doğrudan çözmek oldukça zordur.

Bu çalışmada istenilen esneklik indeksi amacını enaz işletme maliyeti ile sağlayan ısı değiştirici ağ yapısının sentezi MILP formülasyonu ile sağlanmıştır. Belirsizlik parametrelerinde kısıtlanmış eşitsizlik kısıtlamaları ile tanımlanmış alanın konveks olduğu kabul edilmiştir. ‘Algoritma 1’ adı verilen yaklaşımla (Halemane and Grossmann, 1983) Denklem 5.1 yeniden formüle edilerek Denklem 5.2 oluşturulmuştur.

$$\underset{x^n, z^n, u^n}{Min} \phi(d^o, x^o, u^o, z^o, p, \theta^o) \quad n=0, 1, 2, \dots, 2^n \quad (5.2a)$$

$$st: h^n(d^o, x^n, u^n, z^o, p, \theta) = 0 \quad n=0, 1, 2, \dots, 2^n \quad (5.2b)$$

$$g^n(d^o, x^n, u^n, z^o, p, \theta) \leq 0 \quad n=0, 1, 2, \dots, 2^n \quad (5.2c)$$

$$\theta - \theta^o - \delta\theta^n = 0 \quad n=1, 2, \dots, 2^n \quad (5.2d)$$

$$\theta - \theta^o = 0 \quad n=0 \quad (5.2e)$$

$$\theta^n \in R_o(\delta) = \{\theta^n, R(\delta) \text{ nıı verteksidir. } n=1, 2, \dots, 2^n\} \quad (5.2f)$$

Denklem 5.2a besleme akım sıcaklıklarının değişmediği ($n=0$) nominal çalışma şartlarındaki yapının amaç fonksiyonudur. Denklem (5.2b-5.2c) akım sıcaklıklarının

değişmediği ($n=0$) ve her yönde değiştiği ($n=1,2,3, \dots, 2^n$) koşullarda eşitlik ve eşitsizlik kısıtlamalarıdır. Denklem 5.2d θ vektörünün, besleme akım sıcaklıklarında değişim olduğu zaman ($n=1,2,\dots,2^n$) θ^0 'ın normal durumdaki değerinden ($n=0$) skalar esneklik indeksi (δ) kadar + ve - yönde değişik değerler almasını sağlar. Denklem 5.2e normal çalışma şartlarında ($n=0$) esneklik indeksinin (δ) sıfır olduğunu göstermektedir. $R_o(\delta)$, Denklem (5.2b-5.2c) tarafından tanımlanan olurlu bölge içinde bulunması gereken hiper dikdörtgenin köşelerini belirlemektedir.

Amaç Fonksiyonu:

Amaç fonksiyonu toplam işletme maliyeti olarak tanımlanmıştır. Isıtma ve soğutma maliyetlerinden oluşmaktadır (qcu_i , qhu_j). Besleme akım sıcaklıklarında herhangi bir değişimin olmadığı ($n=0$) durumlarda toplam işletme maliyeti enazlanmaktadır.

$$\text{Min} \quad \sum_{i \in HP} qcu_{i,n=0} + \sum_{j \in CP} qhu_{j,n=0} \quad (5.3)$$

$$t_{i,k,n}, t_{j,k,n}, z_{i,j,k,n=0},$$

$$zcu_{i,n=0}, zhu_{j,n=0}, qcu_{i,n},$$

$$qhu_{j,n}, q_{i,j,k,n}$$

Her akım için genel enerji dengesi ($n=0,1, \dots, N$):

Bu kısıtlamalar herhangi bir akımın istenilen hedef sıcaklığına ulaşması için gerekli olan enerjinin, akımın diğer akımlarla, ısıtıcı ve soğutucularla yaptığı toplam ısı transferine eşit olması için koyulmuştur. Her yönde olabilecek bozucu etkiler için tekrar edilmiştir.

$$(T_{i,n}^{in} - T_{i,n}^{out})F_i = \sum_{k \in ST} \sum_{j \in CP} q_{i,j,k,n} + qcu_{i,n} \quad i \in HP, n = 0,1,2, \dots, N \quad (5.4)$$

$$(T_{j,n}^{out} - T_{j,n}^{in})F_j = \sum_{k \in ST} \sum_{i \in HP} q_{i,j,k,n} + qhu_{j,n} \quad j \in CP, n = 0,1,2, \dots, N \quad (5.5)$$

Her kademede enerji dengesi ($n=0, 1, \dots, N$) :

Süperyapıya giren akımlar için her kademede enerji dengesi yazılmalıdır. Kademeler içerisinde sadece muhtemel ısı değiştiriciler vardır. Herhangi bir kademeye giren akımın giriş ve çıkış enerjileri arasındaki fark o akımın kademe içerisinde diğer akımlarla ısı değiştiriciler vasıtasıyla yaptığı ısı transferine eşit olmalıdır. Her yönde olabilecek bozucu etkiler için tekrar edilmiştir.

$$(t_{i,k,n} - t_{i,k+1,n})F_i = \sum_{j \in CP} q_{i,j,k,n} \quad k \in ST, i \in HP, n = 0, 1, 2, \dots, N \quad (5.6)$$

$$(t_{j,k,n} - t_{j,k+1,n})F_j = \sum_{i \in HP} q_{i,j,k,n} \quad k \in ST, j \in CP, n = 0, 1, 2, \dots, N \quad (5.7)$$

İstenilen esneklik indeksi için giriş sıcaklık atamaları ($n=0, 1, \dots, N$):

Akımların besleme sıcaklıklarında istenilen esneklik indeksi kadar artma ve azalma yönünde değişimler olmaktadır. Bu yeni sıcaklıkların giriş sıcaklıkları olarak atanması gerekmektedir. δ her yöndeki değişim miktarını, R_n ise yönünü belirlemektedir. Her yönde olabilecek bozucu etkiler için tekrar edilmiştir.

$$T_{i,n}^{in} = T_{i,n}^{in,o_i} + R_{i,n} \delta \quad i \in HP, n = 0, 1, 2, \dots, N \quad (5.8)$$

$$T_{j,n}^{in} = T_{j,n}^{in,o_j} + R_{j,n} \delta \quad j \in CP, n = 0, 1, 2, \dots, N \quad (5.9)$$

Süperyapı giriş sıcaklıklarının atanması ($n=0, 1, \dots, N$) :

Değişmiş besleme akım sıcaklıkları da süperyapıya giriş sıcaklığı olarak atanmalıdır. Süperyapıda $k=1$ sıcak akımlar için, $k=3$ ise soğuk akımlar için giriş bölgesidir. Her yönde olabilecek bozucu etkiler için tekrar edilmiştir.

$$T_{i,n}^{in} = t_{i,1,n} \quad n = 0, 1, 2, \dots, N \quad (5.10)$$

$$T_{j,n}^{in} = t_{j,ST+1,n} \quad n = 0, 1, 2, \dots, N \quad (5.11)$$

Sıcaklık olurlulukları ($n=0,1, \dots, N$):

Süperyapı içinde birbirini takip eden kademeler boyunca akımların sıcaklıkları düşmekte veya sabit kalmaktadır. Süperyapıdan çıktıklarında hedef sıcaklıklarına ulaşmayan akımlar yapının dışında bulunan ısıtıcılar ve soğutucular sayesinde hedef sıcaklıklarına ulaşmaktadır. Her yönde olabilecek bozucu etkiler için tekrar edilmiştir.

$$t_{i,k,n} \geq t_{i,k+1,n} \quad k \in ST, i \in HP, n = 0,1,2, \dots, N \quad (5.12)$$

$$t_{j,k,n} \geq t_{j,k+1,n} \quad k \in ST, j \in CP, n = 0,1,2, \dots, N \quad (5.13)$$

$$T_{i,n}^{out} \leq t_{i,ST+1,n} \quad i \in HP, n = 0,1,2, \dots, N \quad (5.14)$$

$$T_{j,n}^{out} \geq t_{j,1,n} \quad j \in CP, n = 0,1,2, \dots, N \quad (5.15)$$

Isıtıcı ve soğutucu yükleri ($n=0,1, \dots, N$):

Akımlar süperyapıdan çıktıklarında hedef sıcaklıklarına ulaşamadılar ise ısıtıcı ve soğutucular gerekmektedir. Sıcak akımların yapıdan çıktıkları ve hedef sıcaklığa ulaştıklarındaki enerji farkı ısıtıcıdan alınan enerjiye, soğuk akımların yapıdan çıktıkları ve hedef sıcaklığa ulaştıklarındaki enerji farkı ise soğutucuya verilen enerjiye eşit olmalıdır. Her yönde olabilecek bozucu etkiler için tekrar edilmiştir.

$$(t_{i,ST+1,n} - T_{i,n}^{out})F_i = qcu_{i,n} \quad i \in HP, n = 0,1,2, \dots, N \quad (5.16)$$

$$(T_{j,n}^{out} - t_{j,1,n})F_j = qhu_{j,n} \quad j \in CP, n = 0,1,2, \dots, N \quad (5.17)$$

Mantıksal kısıtlamalar ($n=0,1, \dots, 16$):

Mantıksal kısıtlamalar ve ikili değişkenler sistem içinde ısı değiştiricilerden, ısıtıcılardan ve soğutuculardan hangilerinin bulunacağını belirlemek için gereklidir. İkili değişkenler ısı değiştiriciler için $z_{i,j,k}$, soğutucular için zcu_i ve ısıtıcılar için zhu_j şeklinde gösterilmiştir. Her yönde olabilecek bozucu etkiler için tekrar edilmiştir.

$$q_{i,j,k,n} - \Omega z_{i,j,k,n=0} \leq 0 \quad k \in ST, i \in HP, j \in CP, n = 0, 1, 2, \dots, N \quad (5.18)$$

$$qcu_{i,n} - \Omega zcu_{i,n=0} \leq 0 \quad i \in HP, n = 0, 1, 2, \dots, N \quad (5.19)$$

$$qhu_{j,n} - \Omega zhu_{j,n=0} \leq 0 \quad j \in CP, n = 0, 1, 2, \dots, N \quad (5.20)$$

$$z_{i,j,k,n=0}, zcu_{i,n=0}, zhu_{j,n=0} = 0, 1 \quad n=0 \quad (5.21)$$

Yaklaşım sıcaklığı tanımlamaları ($n=0, 1, \dots, N$):

Akımlar arasındaki yaklaşım sıcaklığı (ΔT_m) normal çalışma koşullarında istenilen yaklaşım sıcaklığında, besleme sıcaklıklarında değişim olduğu zaman ise enaz sıfırdan büyük olmalıdır. Her yönde olabilecek bozucu etkiler için tekrar edilmiştir.

$$dt_{i,j,k,n=0} \geq \Delta T_{\min} \quad i \in HP, j \in CP, n = 0, 1, 2, \dots, N \quad (5.22)$$

$$dt_{i,j,k,n \neq 0} \geq 0 \quad i \in HP, j \in CP, n = 1, 2, \dots, N \quad (5.23)$$

Yaklaşım sıcaklığı hesaplamaları ($n=0, 1, \dots, N$):

Ünitelerin alan hesaplamaları için nominal çalışma şartları ve besleme akım sıcaklıklarında değişim olduğu durumlar için yaklaşım sıcaklıklarının belirlenmesi gerekmektedir. Her yönde olabilecek bozucu etkiler için tekrar edilmiştir.

$$dt_{i,j,k,n} \leq t_{j,k,n} - t_{j,k,n} + \Gamma(1 - z_{i,j,k,n=0}) \quad k \in ST, i \in HP, j \in CP, n = 0, 1, 2, \dots, N \quad (5.24)$$

$$dt_{i,j,k+1,n} \leq t_{j,k+1,n} - t_{j,k+1,n} + \Gamma(1 - z_{i,j,k,n=0}) \quad k \in ST, i \in HP, j \in CP, n = 0, 1, 2, \dots, N \quad (5.25)$$

$$dtcu_{i,n} \leq t_{i,ST+1,n} - T_{CU,n}^{out} + \Gamma(1 - z_{i,j,k,n=0})$$

$$i \in HP, n = 0, 1, 2, \dots, N \quad (5.26)$$

$$dthu_{j,n} \leq T_{HU,n}^{out} - t_{j,1,n} + \Gamma(1 - z_{i,j,k,n=0})$$

$$j \in CP, n = 0, 1, 2, \dots, N \quad (5.27)$$

Ençok Isı Değiştirici Sayısı:

Isı değiştirici ağı sentezi sonucunda çözümde bulunması istenilen ısı değiştirici sayılarının da formülasyonda verilebilir. Ençok ısı değiştirici sayısı; akım sayısı + ütilite sayısı + döngü sayısı – problem sayısı olarak verilmiştir (Douglas 1988).

$$\sum z_{i,j,k} + zcu_i + zhu_j = EIDS \quad i \in HP, j \in CP, n = 0 \quad (5.28)$$

Yee and Grossmann'ın (1990) iki kademeli süperyapısı ve süperyapı formülasyonları esneklik indeksini de içine alacak şekilde geliştirilmiş ve besleme akım sıcaklıklarında her yönde olabilecek bozucu etkiler altında çalışabilen ısı değiştirici ağı için nominal çalışma şartlarında toplam işletme maliyetini hesaplayan bir formülasyon sunulmuştur. Bu formülasyon istenilen esneklik indeksi değerlerinin değiştirilerek toplam işletme maliyetinin ve yapıların değişiminin izlenmesini sağlamaktadır.

6. ÖRNEK PROBLEMLER

Bu bölümde beşinci bölümde sunulan formülasyon literatürden seçilen örnek ısı değiştirici ağ problemleri üzerinde sınanmıştır.

6.1 Problem-1

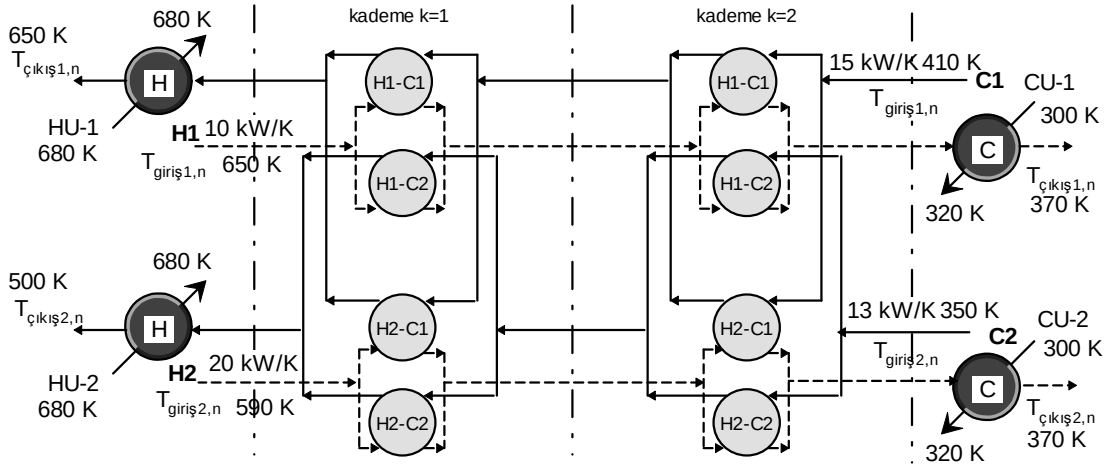
Problem-1’de iki sıcak akım ve iki soğuk akımdan oluşan ısı değiştirici ağ problemi incelenmiştir. Problem Tablo 6.1’de tanımlandığı gibidir. Konukman *et.al.* tarafından problemin ençok 6 ısı değiştiricili ve 2 kademeli süperyapılı çözümü yapılmıştır (1999). Bu bölümde süperyapı kademe sayısı 3’e çıkarılarak, ençok ısı değiştirici sayısı 5’e ve 4’e düşürülerek problem çözülmüştür.

Tablo 6.1 Problem-1’in Tanımı

AKIMLAR	HCF (kW/K)	Tgiriş (K)	Tçıkış (K)
Sıcak Akım 1 (H1)	10	650	370
Sıcak Akım 2 (H2)	20	590	370
Soğuk Akım 1 (C1)	15	410	650
Soğuk Akım 2 (C2)	13	350	500
BUHAR	-	680	680
SOĞUTMA SUYU	-	300	320

Şekil 6.1 iki sıcak ve iki soğuk akımdan oluşan süperyapılı ısı değiştirici ağ yapısını göstermektedir. Şekilde gösterildiği gibi süperyapı iki kademedir oluşmaktadır. Her kademede sıcak ve soğuk akımların karşılaşabileceği dörder tane muhtemel ısı değiştirici bulunmaktadır. Isı değiştiricilerin isimlendirilmesinde **H** sıcak akımı, **C** ise soğuk akımı ifade etmektedir. Örneğin **H1-C1** olarak gösterilen ısı değiştirici birinci sıcak akımla birinci soğuk akımın karşılaştığı yeri göstermektedir. Minimum ütilite sarfiyatlı ağ tasarımında bulunabilecek ısı

değiştirici sayısı, akım sayısı + ütilite sayısı + döngü sayısı – problem sayısı olarak verilmiştir (Douglas, 1988). Pinch yöntemi için toplam ısı değiştirici sayısı pinch altında ve üstünde bulunan ısı değiştiricilerin toplamıdır. Problemin pinch çözümünde 6 ısı değiştirici bulunmuştur.



Şekil 6.1 İki Kademeli Süperyapı ve Akım Verileri

6.1.1 Durum Çalışması-1

Bu durum için iki kademeli süperyapıda bulunabilecek toplam birim sayısı (ısı değiştirici, ısıtıcı, soğutucu) en çok 6 ile sınırlandırılmıştır (Denklem 5.28). Problemin bu şartlar altındaki çözümü Konukman *et.al.* (1999) tarafından yapılmıştır. İkinci soğuk akımın giriş sıcaklığı 350 K ve çıkış sıcaklığı 500 K olduğu için istenilen esneklik indeksi değerleri 0 K'den 150 K'e kadar basamak basamak artırılarak toplam işletme maliyeti seviyelerinin ve ısı değiştirici ağı yapısal gruplarının değişimi incelenmiştir. Formülasyon GAMS ile kodlanmış, istenilen esneklik indeksi değerleri 0.1 K aralıklarla artırılarak program çalıştırılmış ve sonuçlar 1 K aralık miktarı için Tablo 6.2'de verilmiştir. Hesap yönteminin akış diagramı Ek-3'de görülebilir. Ek-2'de GAMS hakkında özet bilgi verilmiştir. Ek-4'de ise örnek GAMS kodu verilmiştir. Tablo 6.2 0 K'den 150 K'e kadar istenilen esneklik indekslerini, bu esneklik değerlerinde bulunan ısı değiştirici ağ yapılarını ve bu yapıların toplam işletme maliyetlerini vermektedir.

Tablo 6.2 İstenilen Esneklik İndeksi Değişimi ile Isı Değiştirici Ağlarının ve Maliyetlerinin Değişimi

δ^*	Z_{111}	Z_{121}	Z_{211}	Z_{221}	Z_{112}	Z_{122}	Z_{212}	Z_{222}	Z_{HU1}	Z_{HU2}	Z_{CU1}	Z_{CU2}	Top.
1	1					1	1		1		1	1	2550
2	1					1	1		1		1	1	2550
3	1					1	1		1		1	1	2550
4	1					1	1		1		1	1	2550
5	1					1	1		1		1	1	2550
6	1					1	1		1		1	1	2550
7	1					1	1		1		1	1	2550
8	1					1	1		1		1	1	2550
9	1					1	1		1		1	1	2550
10	1					1	1		1		1	1	2550
11	1					1	1		1		1	1	2550
12	1					1	1		1		1	1	2550
13	1					1	1		1		1	1	2550
14	1					1	1		1		1	1	2550
15	1					1	1		1		1	1	2550
16	1					1	1		1		1	1	2550
17	1					1	1		1		1	1	2550
18	1					1	1		1		1	1	2550
19	1					1	1		1		1	1	2550
20	1					1	1		1		1	1	2550
21	1					1	1		1		1	1	2550
22	1					1	1		1		1	1	2550
23	1					1	1		1		1	1	2550
24	1					1	1		1		1	1	2550
25	1					1	1		1		1	1	2550
26	1					1	1		1		1	1	2550
27	1					1	1		1		1	1	2550
28	1					1	1		1		1	1	2550
29	1					1	1		1		1	1	2550
30	1					1	1		1		1	1	2550
31	1					1	1		1		1	1	2550
32	1					1	1		1		1	1	2550
33	1					1	1		1		1	1	2550
34	1					1	1		1		1	1	2550
35	1					1	1		1		1	1	2550
36	1					1	1		1		1	1	2550
37	1		1					1	1		1	1	3750
38	1		1					1	1		1	1	3750
39	1		1					1	1		1	1	3750
40	1		1					1	1		1	1	3750
41						1	1		1	1	1	1	3750
42	1		1					1	1		1	1	3750
43			1		1			1	1		1	1	3750
44	1		1					1	1		1	1	3750
45				1		1	1		1		1	1	3750
46		1	1					1	1		1	1	3750
47		1	1						1	1	1	1	3750
48	1		1					1	1		1	1	3750
49	1		1					1	1		1	1	3750
50	1		1					1	1		1	1	3750
51	1		1					1	1		1	1	3750
52	1		1					1	1		1	1	3750
53	1		1					1	1		1	1	3750
54		1	1						1	1	1	1	3750
55	1		1					1	1		1	1	3750
56	1		1					1	1		1	1	3750
57	1		1					1	1		1	1	3750
58	1		1					1	1		1	1	3750
59		1	1						1	1	1	1	3750
60	1		1					1	1		1	1	3750
61			1		1			1	1		1	1	3750
62	1		1					1	1		1	1	3750
63	1		1					1	1		1	1	3750

Tablo 6.2'nin Devamı

64		1	1					1	1	1	1	3750
65	1		1					1	1		1	3750
66	1		1					1	1		1	3750
67	1		1					1	1		1	3750
68	1		1					1	1		1	3750
69	1		1					1	1		1	3750
70	1		1					1	1		1	3750
71		1	1						1	1	1	3750
72		1	1						1	1	1	3750
73	1		1					1	1		1	3750
74	1		1					1	1		1	3750
75		1	1						1	1	1	3750
76		1					1		1	1	1	3750
77		1	1						1	1	1	3750
78			1			1			1	1	1	3750
79		1					1		1	1	1	3750
80			1			1			1	1	1	3750
81		1	1						1	1	1	3750
82		1	1						1	1	1	3750
83						1	1		1	1	1	3750
84						1	1		1	1	1	3750
85						1	1		1	1	1	3750
86						1	1		1	1	1	3750
87		1					1		1	1	1	3750
88		1					1		1	1	1	3750
89		1	1						1	1	1	3750
90			1			1			1	1	1	4250
91	1			1					1	1	1	4250
92	1							1	1	1	1	4250
93					1			1	1	1	1	4250
94				1	1				1	1	1	4250
95	1			1					1	1	1	4250
96				1	1				1	1	1	4250
97					1			1	1	1	1	4250
98	1			1					1	1	1	4250
99	1							1	1	1	1	4250
100	1							1	1	1	1	4250
101					1			1	1	1	1	4250
102	1			1					1	1	1	4250
103	1							1	1	1	1	4250
104	1							1	1	1	1	4250
105	1							1	1	1	1	4250
106	1							1	1	1	1	4250
107	1							1	1	1	1	4250
108	1			1					1	1	1	4250
109	1							1	1	1	1	4250
110	1							1	1	1	1	4250
111	1							1	1	1	1	4250
112	1							1	1	1	1	4250
113	1							1	1	1	1	4250
114	1							1	1	1	1	4250
115				1	1				1	1	1	4250
116	1							1	1	1	1	4250
117	1			1					1	1	1	4250
118	1							1	1	1	1	4250
119				1	1				1	1	1	4250
120					1			1	1	1	1	4250
121		1				1			1	1	1	8850
122		1				1			1	1	1	8850
123						1			1	1	1	8850
124		1				1			1	1	1	8850
125						1			1	1	1	8850
126		1				1			1	1	1	8850
127		1				1			1	1	1	8850
128		1				1			1	1	1	8850
129						1			1	1	1	8850
130		1							1	1	1	8850
131						1			1	1	1	8850

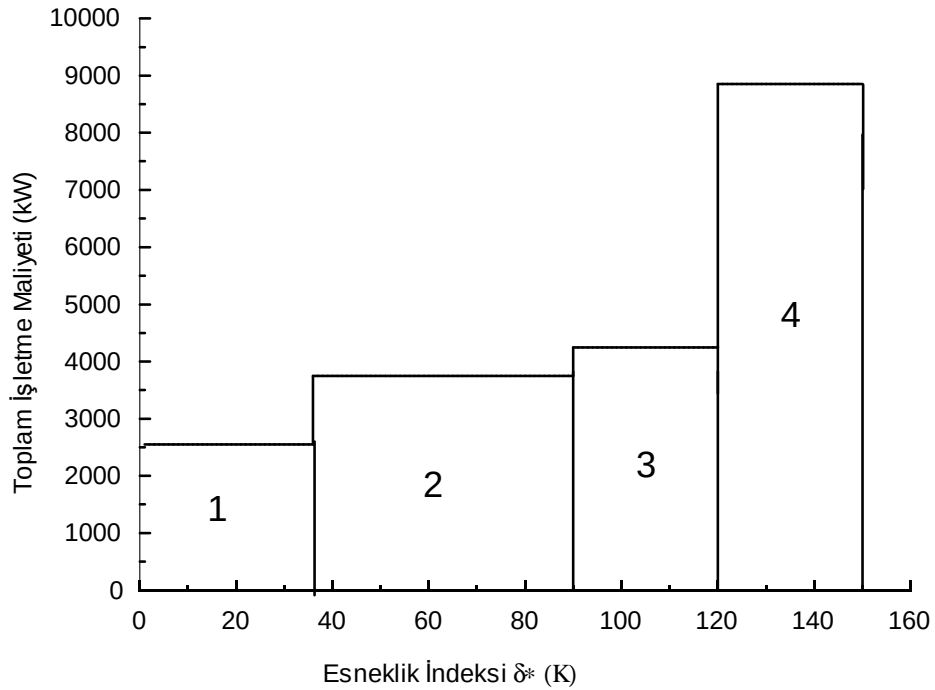
Tablo 6.2'nin Devamı

132		1						1	1	1	1	8850
133		1				1		1	1	1	1	8850
134		1				1		1	1	1	1	8850
135						1		1	1	1	1	8850
136						1		1	1	1	1	8850
137		1						1	1	1	1	8850
138		1						1	1	1	1	8850
139						1		1	1	1	1	8850
140		1				1		1	1	1	1	8850
141		1						1	1	1	1	8850
142						1		1	1	1	1	8850
143						1		1	1	1	1	8850
144		1						1	1	1	1	8850
145						1		1	1	1	1	8850
146		1				1		1	1	1	1	8850
147		1						1	1	1	1	8850
148		1						1	1	1	1	8850
149		1						1	1	1	1	8850
150						1		1	1	1	1	8850

Tablo 6.2 incelendiğinde istenilen esneklik indeksi değerlerinin artırılması ile daha yüksek ısıtma ve soğutma ihtiyacı olan ısı değiştirici ağ yapılarının bulunduğu görülmektedir. Bir önceki bölümde formülasyonda görüldüğü gibi z_{ijk} , z_{HU} , z_{CU} ısı değiştiricinin sentez sonucunda çözümde bulunup bulunmayacağını belirleyen ikili değişkenlerdir. z_{111} birinci kademede, birinci sıcak akımla birinci soğuk akımın karşılaşmasının olduğunu göstermektedir. Aynı ısı değiştirici ağ yapısı farklı esneklik değerlerinde de bulunmuştur. Örneğin z_{111} , z_{211} , z_{222} , z_{HU1} , z_{CU1} ve z_{CU2} ısı değiştiricilerinden oluşan ağ yapıları 37 K, 40 K, 48 K, 53 K, 58 K 67 K, 74 K gibi esneklik değerlerinde gözlenmiştir. Benzer şekilde diğer ağ yapıları da değişik esneklik değerlerinde gözlenmiştir. Bu problemde çoklu çözüm söz konusudur. İstenilen esneklik indeksi için program çalıştırıldığında aynı miktarda ısıtma ve soğutma ihtiyacına gerek duyan ve besleme akım sıcaklıklarındaki değişimleri istenilen miktarda (aynı miktarda) tolere edebilen birden fazla yapı olması halinde algoritma bu yapılar içinden birini vermektedir.

Elde edilen ısı değiştirici ağ yapılarının besleme akım sıcaklıklarında her yönde olabilecek bozucu etkileri en çok ne kadar tolere edebilecekleri (her yön için esneklik miktarları) GAMS/XA ile kodlanmış başka bir program ile hesaplanmış ve bu değerler içinde en az olan değer yapının esneklik indeksi (δ^*) olarak tespit edilmiştir. Ek-1'de programın örnek GAMS kodu verilmiştir.

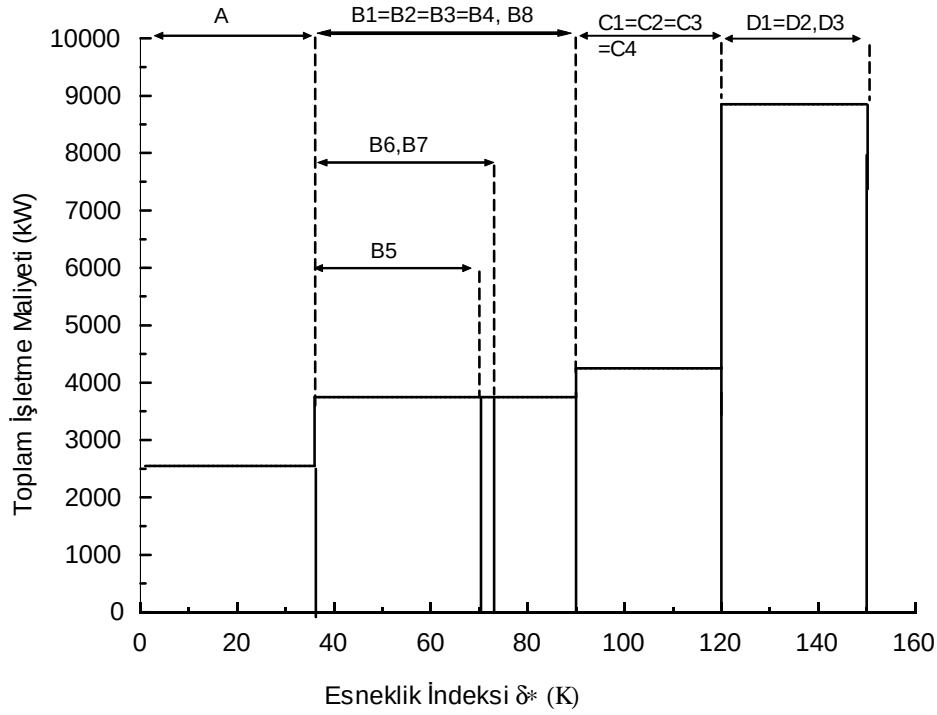
Şekil 6.2 istenilen esneklik indeksi değeri ile toplam işletme maliyetinin değişimini göstermektedir. Şekil incelendiğinde toplam işletme maliyeti için dört farklı bölge görülmektedir. Birinci bölge 0 K ile 36.95 K arasında esneklik indeksini ve 2550 kW toplam işletme maliyetini, ikinci bölge 36.95 K ile 90 K arasında esneklik indeksini ve 3750 kW toplam işletme maliyetini, üçüncü bölge 90 K ile 120 K arasında esneklik indeksini ve 4250 kW toplam işletme maliyetini, dördüncü bölge ise 120 K ile 150 K arasında esneklik indeksini ve 8850 kW'lık toplam işletme maliyetini göstermektedir.



Şekil 6.2 Toplam İşletme Maliyetinin Esneklik İndeksine Göre Değişimi

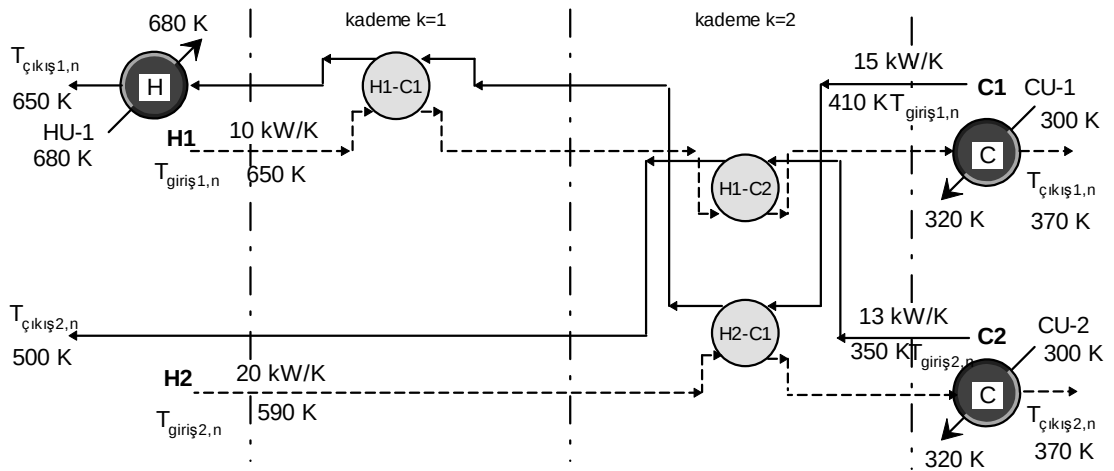
Bu bölgelerin her birinin içinde bir veya birden çok ısı değiştirici ağ yapısı bulunmuştur. Farklı ikili değişken takımlarından oluşmalarına rağmen aslında aynı olan yapılar da görülmüştür. Örneğin z_{211} ve z_{121} ısı değiştiricilerinden oluşan yapı ($\delta^*=59$ K), z_{212} ve z_{122} ısı değiştiricilerinden oluşan yapının ($\delta^*=85$ K) aynısıdır (Tablo 6.2).

Şekil 6.3 istenilen esneklik miktarının değişimiyle toplam işletme maliyetinin değişimini, oluşan bölgeler içinde bulunan yapılarla birlikte göstermektedir. Birinci bölge içinde tek bir yapı, ikinci bölge içinde sekiz yapı, üçüncü bölge içinde dört yapı ve son olarak dördüncü bölge içinde üç yapı bulunmaktadır.

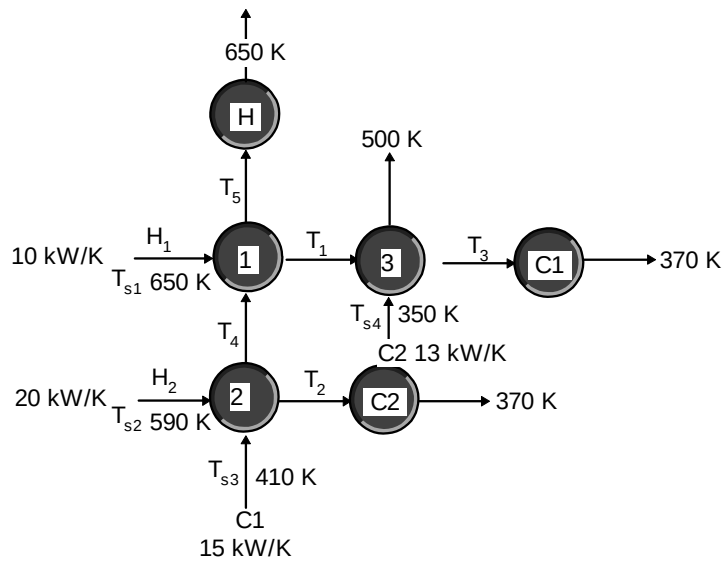


Şekil 6.3 Nominal Çalışma Şartlarında A'dan D3'e Toplam İşletme Maliyetlerinin Esneklik İndeksine (δ^*) Göre Değişimi.

Birinci bölge içinde, $0 K \leq \delta^* \leq 36.95 K$ aralığında esnek, 2550 kW'lık toplam ütilite tüketimi olan (450 kW ısıtma, 2100 kW soğutma) tek bir yapı (P1D-A) vardır (Şekil 6.4). Formülasyona istenilen esneklik değeri olarak 0 K'den 36.95 K değerine kadar uygulanan tüm değerler için bu tek yapının elde edilmiş olması, bu yapının esneklik indeksi değerinin 36.95 K olduğunu göstermektedir. Bu yapı aynı zamanda IDA probleminin pinch çözümüdür. Yapı üç ısı değiştirici, iki soğutucu ve bir ısıtıcıdan oluşmaktadır. H1-C1 ısı değiştiricisi birinci kademede, H1-C2 ve H2-C1 ısı değiştiricileri ikinci kademede bulunmaktadır. Sıcak akımların çıkışlarında birer soğutucu, birinci soğuk akımın çıkışında ise bir tane ısıtıcı bulunmaktadır.



Şekil 6.4-a P1D1-A Yapısı



Şekil 6.4-b P1D1-A Yapısı

Şekil 6.3'den P1D1-A yapısının esneklik indeksi değeri 36.95 K olduğu görülmekle beraber aşağıda bu yapının esneklik indeksinin hesabı için gerekli denklemler verilmiştir.

Maximize δ

Isı değiştiricilerin enerji dengeleri:

$$\text{ID1} \quad : 10(T_{1S} - T_1) + 15(T_4 - T_5) = 0 \quad (6.1)$$

$$\text{ID2} \quad : 20(T_{2S} - T_2) + 15(T_{3S} - T_4) = 0 \quad (6.2)$$

$$\text{ID3} \quad : 10(T_1 - T_3) + 13(T_{4S} - 500) = 0 \quad (6.3)$$

Isı değiştiricilerin ısı yükü kısıtlamaları:

$$\text{ID1} \quad : T_1 - T_{1S} \leq 0, \quad T_4 - T_5 \leq 0 \quad (6.4)$$

$$\text{ID2} \quad : T_2 - T_{2S} \leq 0, \quad T_{3S} - T_4 \leq 0 \quad (6.5)$$

$$\text{ID3} \quad : T_3 - T_1 \leq 0, \quad T_{4S} - 500 \leq 0 \quad (6.6)$$

$$\text{Isıtıcı(1)} \quad : T_3 \geq 370 \quad (6.7)$$

$$\text{Isıtıcı(2)} \quad : T_2 \geq 370 \quad (6.8)$$

$$\text{Soğutucu(1)} \quad : T_5 \leq 650 \quad (6.9)$$

Isı değiştiricilerin yaklaşım sıcaklığı(ΔT_m) kısıtlamaları :

$$\text{ID1} \quad : T_5 - T_{1S} \leq 0, \quad T_4 - T_1 \leq 0 \quad (6.10)$$

$$\text{ID2} \quad : T_4 - T_{2S} \leq 0, \quad T_{3S} - T_2 \leq 0 \quad (6.11)$$

$$\text{ID3} \quad : 500 - T_1 \leq 0, \quad T_{4S} - T_3 \leq 0 \quad (6.12)$$

$$\begin{bmatrix} T_{S1} \\ T_{S2} \\ T_{S3} \\ T_{S4} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 650 \\ 590 \\ 410 \\ 350 \end{bmatrix} + \theta_n \delta, \quad \theta_1 = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix}, \quad \dots\dots\dots, \quad \theta_{16} = \begin{bmatrix} -1 \\ -1 \\ -1 \\ -1 \end{bmatrix} \quad (6.13)$$

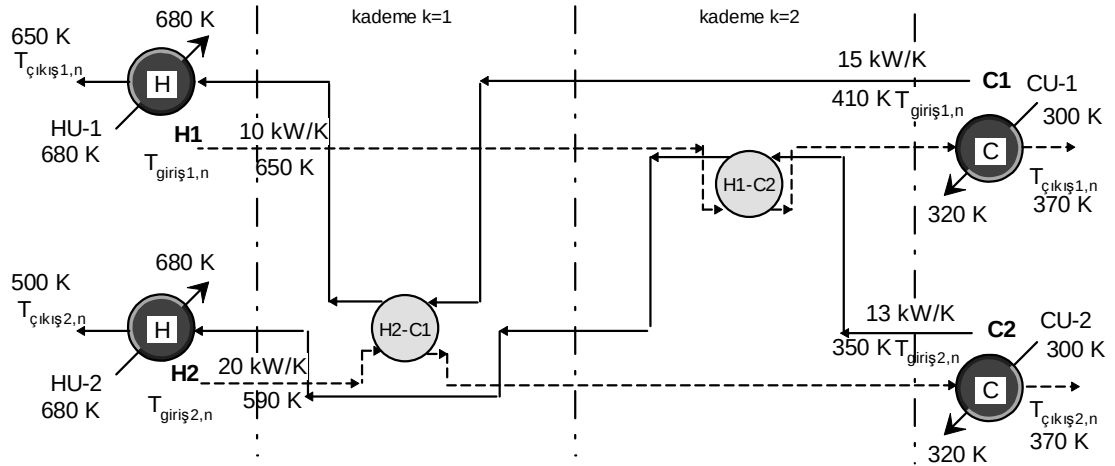
Tablo 6.3 incelendiğinde ençok esneklik değerleri (δ) içinde minimum olan 36.95 K değerinin P1D1-A yapısının esneklik indeksi (δ^*) olduğu görülmektedir. Diğer bir ifadeyle, P1D1-A yapısı nominal çalışma koşullarında 2550 kW'lık toplam işletme maliyeti ile çalışabilmekte ve aynı zamanda besleme akımlarının sıcaklıklarının nominal koşullardan ± 36.95 K sapması durumunda dahi fiziksel olarak fizibil kalabilmektedir.

Tablo 6.3 P1D1-A Yapısının Tüm Bozucu Etki Yönleri İçin Ençok Esneklik Değerleri (δ)

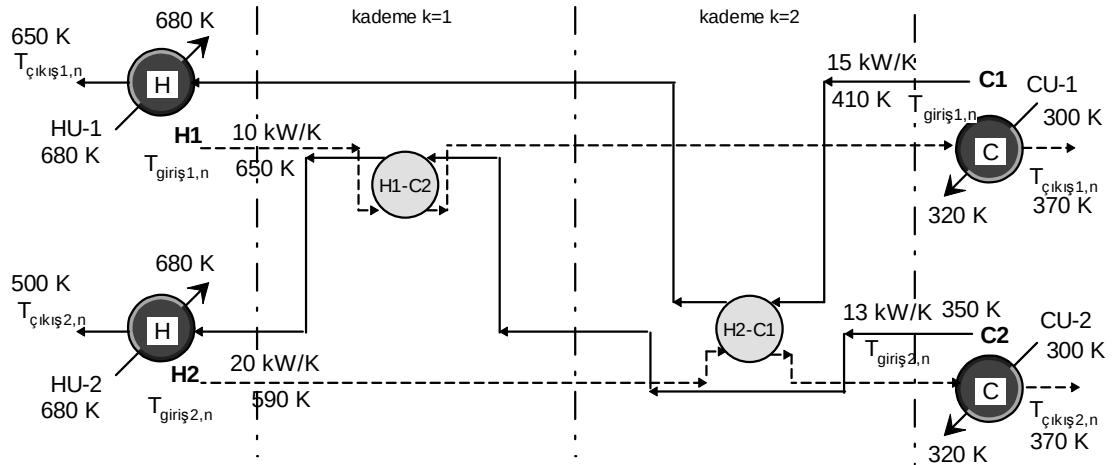
Bozucu Etki Yönü $T_{S1}, T_{S2}, T_{S3}, T_{S4}$	Ençok Esneklik, $\delta, (K)$	Bozucu Etki Yönü $T_{S1}, T_{S2}, T_{S3}, T_{S4}$	Ençok Esneklik, $\delta, (K)$
+ + + +	150	- + + +	120
+ + + -	240	- + + -	36.95
+ + - +	240	- + - +	150
+ + - -	283.3	- + - -	36.95
+ - + +	90	- - + +	90
+ - + -	90	- - + -	36.95
+ - - +	150	- - - +	150
+ - - -	220	- - - -	36.95

Esneklik İndeksi (δ^*)	36.95 K
---------------------------------	----------------

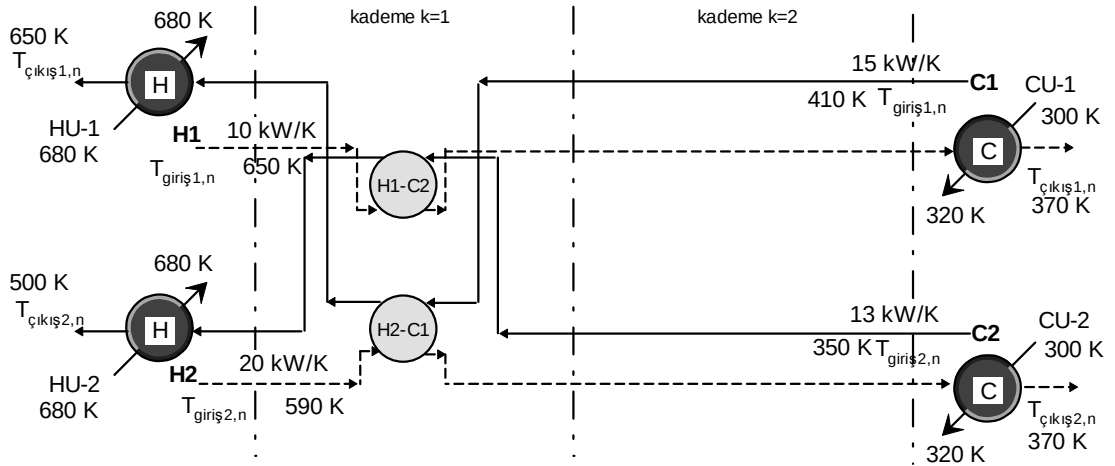
İkinci bölge 36.95 K'den 90 K'e kadar esneklik indeksini ve 3750 kW toplam işletme maliyetini göstermektedir. Bölge içinde P1D1-B1, P1D1-B2, P1D1-B3, P1D1-B4, P1D1-B5, P1D1-B6, P1D1-B7 ve P1D1-B8 yapıları bulunmaktadır. P1D1-B1 yapısı Şekil 6.5'de, P1D1-B2 yapısı Şekil 6.6'da, P1D1-B3 yapısı Şekil 6.7'de, P1D1-B4 yapısı Şekil 6.8'de, P1D1-B5 yapısı Şekil 6.10'da, P1D1-B6 yapısı Şekil 6.11'da, P1D1-B7 yapısı Şekil 6.12'de, P1D1-B8 yapısı Şekil 6.13'de gösterilmiştir. Yapıların ısıtma maliyetleri 1050 kW ve soğutma maliyetleri 2700 kW olarak bulunmuştur. P1D1-B1, P1D1-B2, P1D1-B3 ve P1D1-B4 ısı değiştiricileri yapıları farklı ikili değişkenler ile oluşmalarına rağmen birbirlerinin aynısıdır.



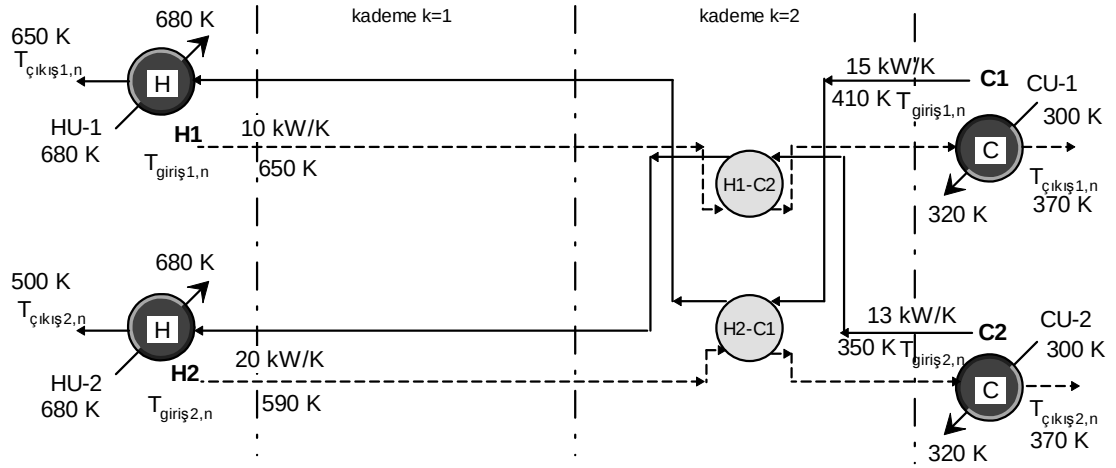
Şekil 6.5 P1D1-B1 Yapısı



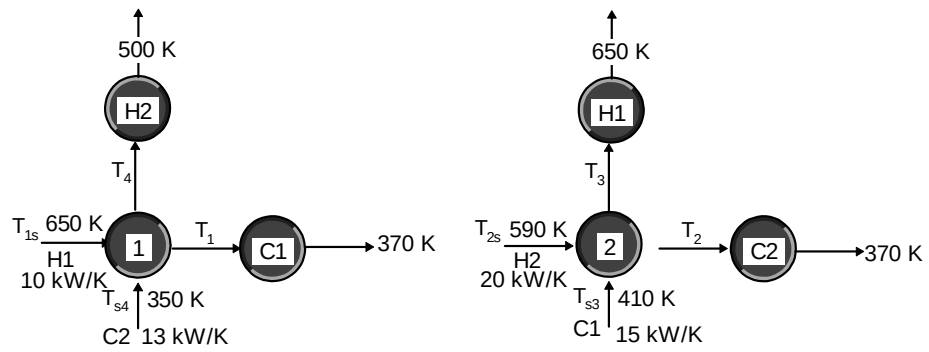
Şekil 6.6 P1D1-B2 Yapısı



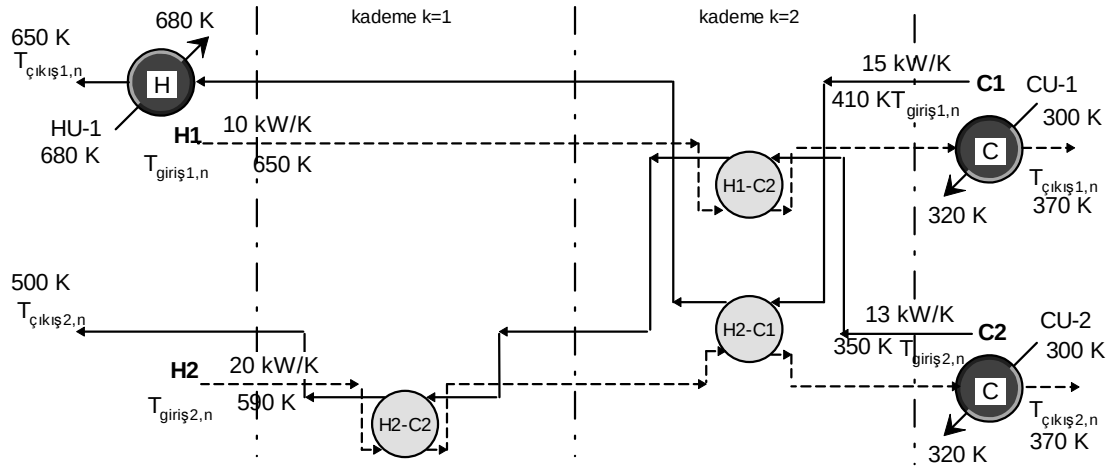
Şekil 6.7 P1D1-B3 Yapısı



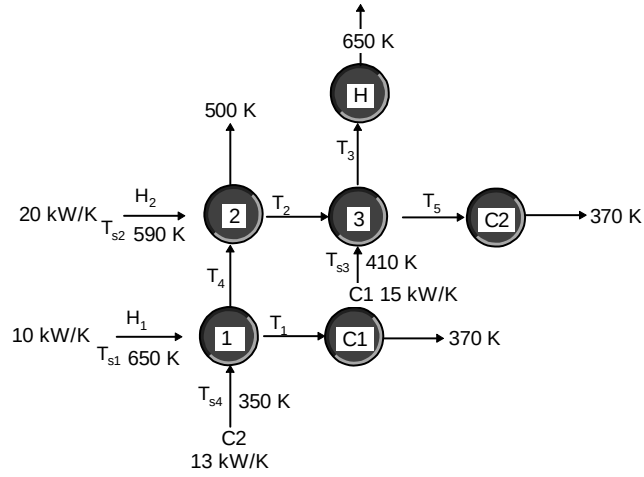
Şekil 6.8 P1D1-B4 Yapısı



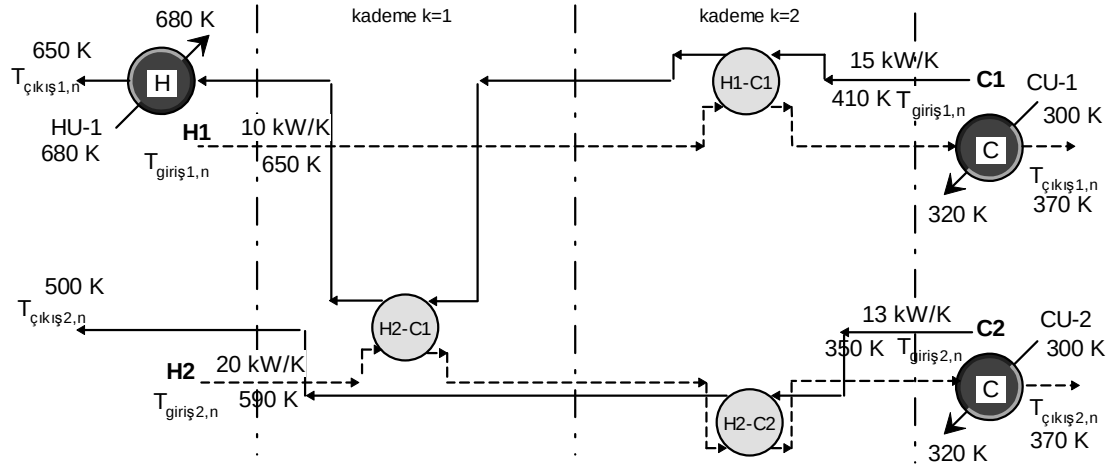
Şekil 6.9 P1D1-B1, P1D1-B2, P1D1-B3 ve P1D1-B4 Yapıları



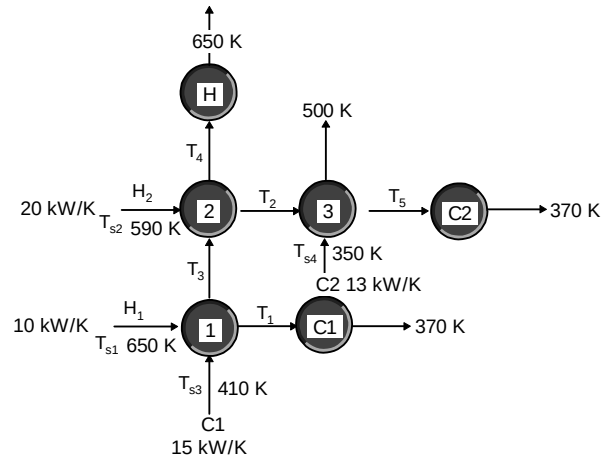
Şekil 6.10-a P1D1-B5 Yapısı



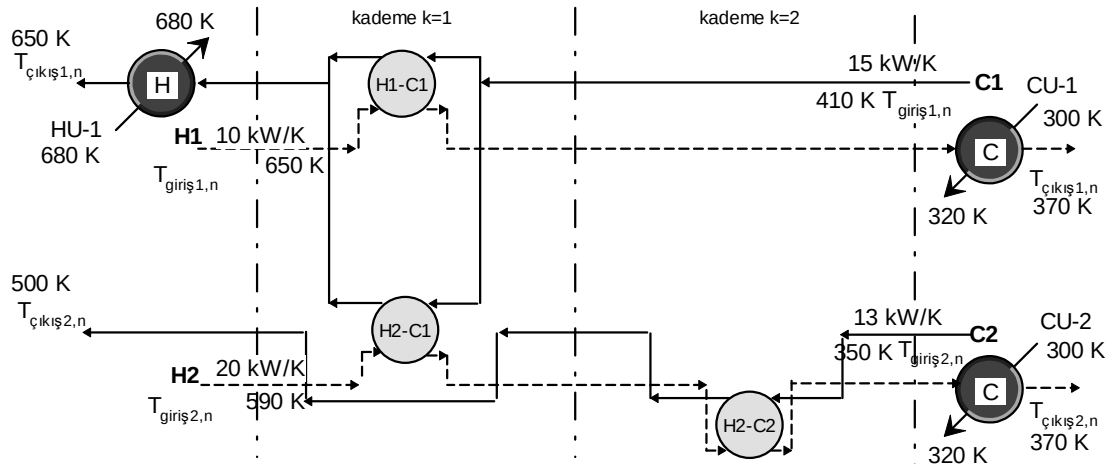
Şekil 6.10-b P1D1-B5 Yapısı



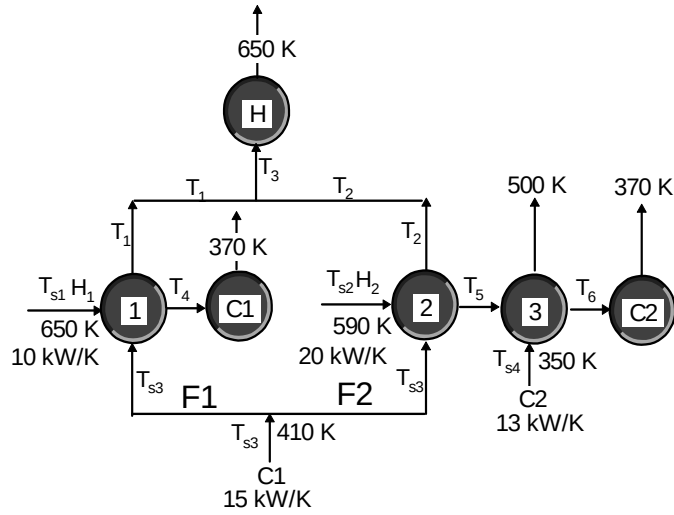
Şekil 6-11-a P1D1-B6 Yapısı



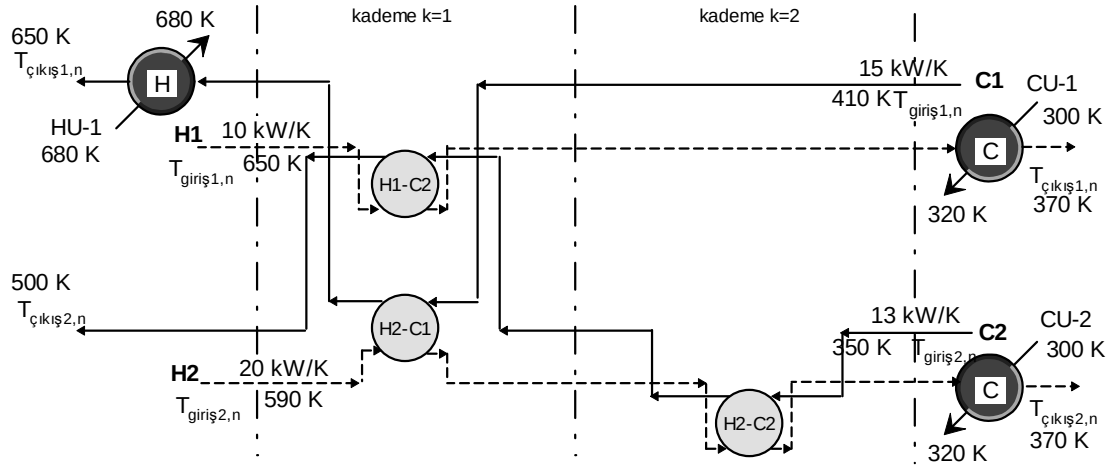
Şekil 6-11-b P1D1-B6 Yapısı



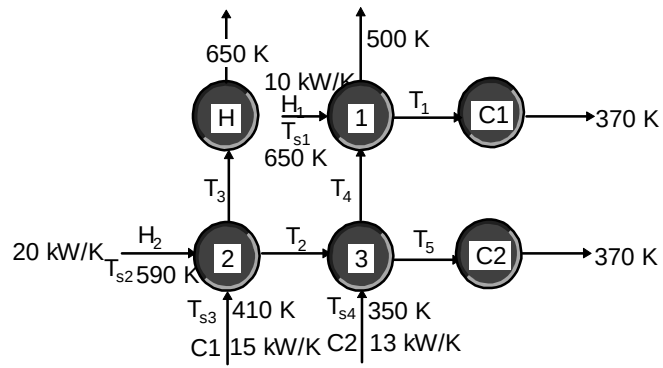
Şekil 6.12-a P1D1-B7 Yapısı



Şekil 6.12-b P1D1-B7 Yapısı

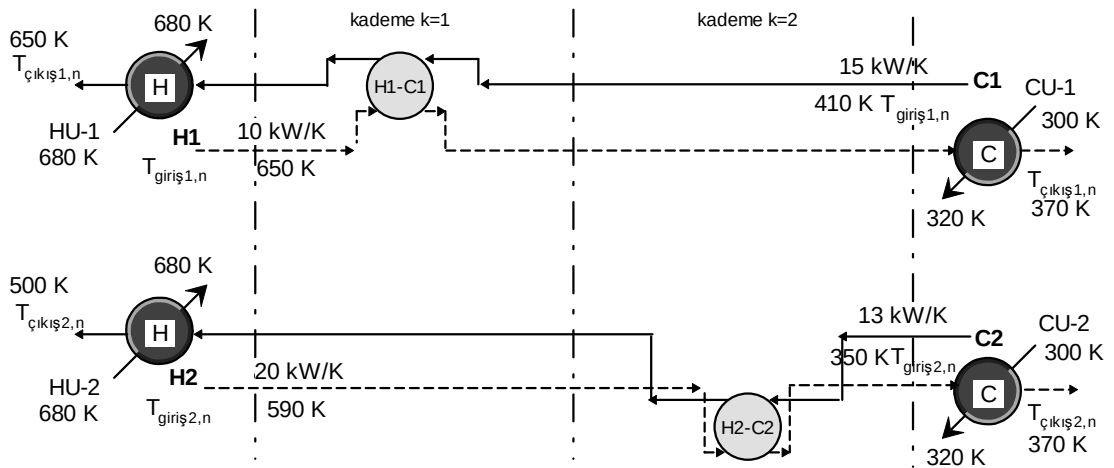


Şekil 6.13-a P1D1-B8 Yapısı

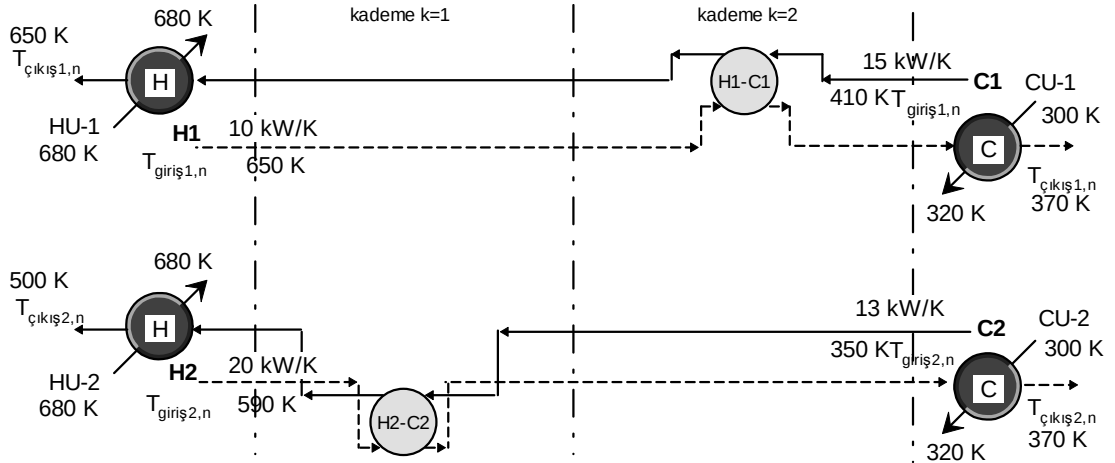


Şekil 6-13-b P1D1-B8 Yapısı

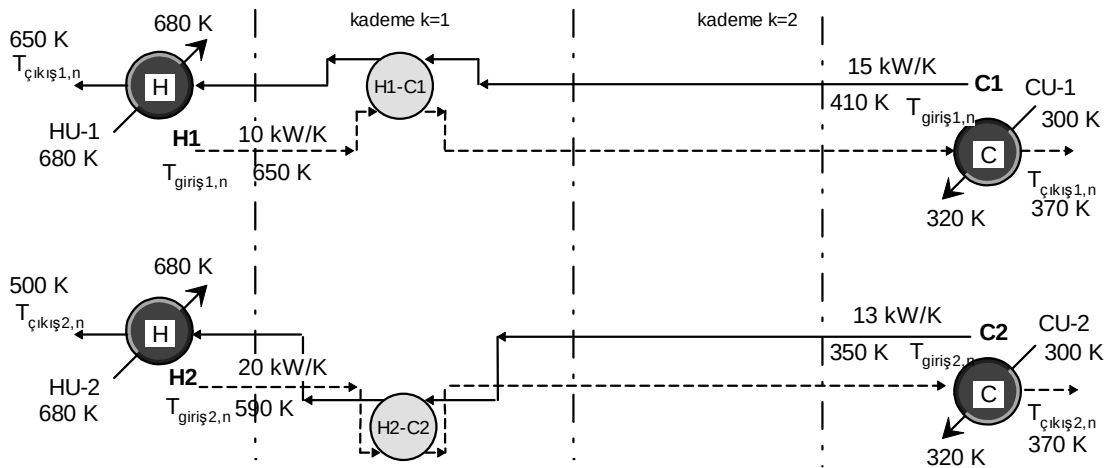
Üçüncü bölge 90 K'den 120 K'e kadar istenilen esneklik indeksini ve 4250 kW'lık toplam işletme maliyetini göstermektedir. Bölge içinde birbirinin aynı olan ve süper yapının çeşitli kademelerinde görülen dört yapı mevcuttur ($P1D1-C1 = P1D1-C2 = P1D1-C3 = P1D1-C4$). Şekil 6.14 P1D1-C1 yapısını, Şekil 6.15 P1D1-C2 yapısını, Şekil 6.16 P1D1-C3 yapısını ve Şekil 6.17 P1D1-C4 yapısını göstermektedir. Yapıların nominal çalışma koşullarında ısıtma maliyeti 1300 kW, soğutma maliyetleri ise 2950 kW'tır. Bütün yapılar iki ısı değiştirici, iki soğutucu ve iki ısıtıcıdan oluşmaktadır. H1-C1 ve H2-C2 ısı değiştiricileri farklı ikili değişkenler ile oluşmalarına rağmen ($z_{111}-z_{112}$, $z_{221}-z_{222}$) birbirlerinin aynısı olarak görülmektedirler.



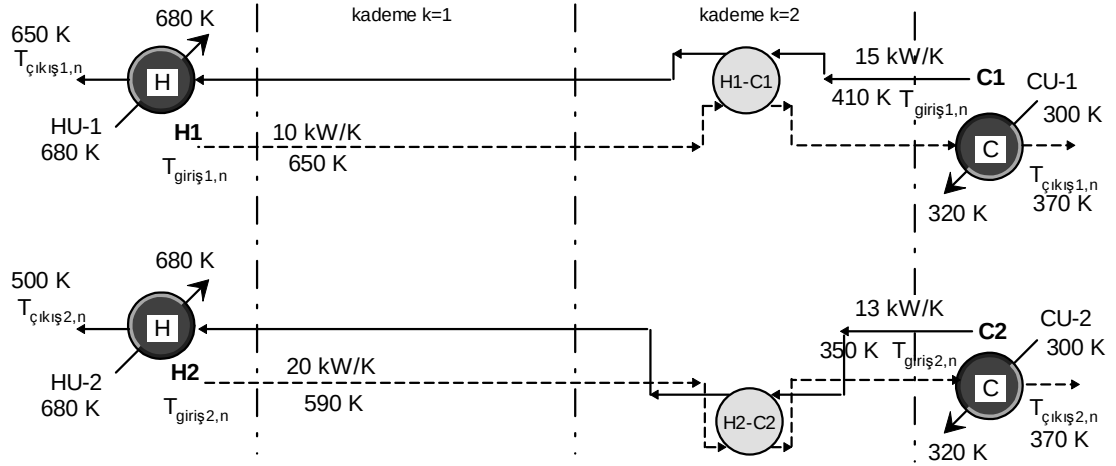
Şekil 6.14 P1D1-C1 Yapısı



Şekil 6.15 P1D1-C2 Yapısı

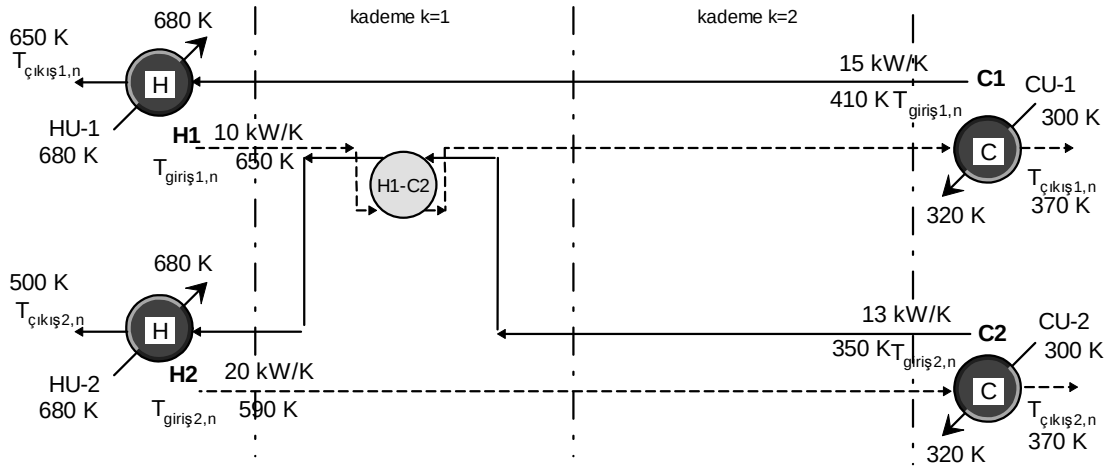


Şekil 6.16 P1D1-C3 Yapısı

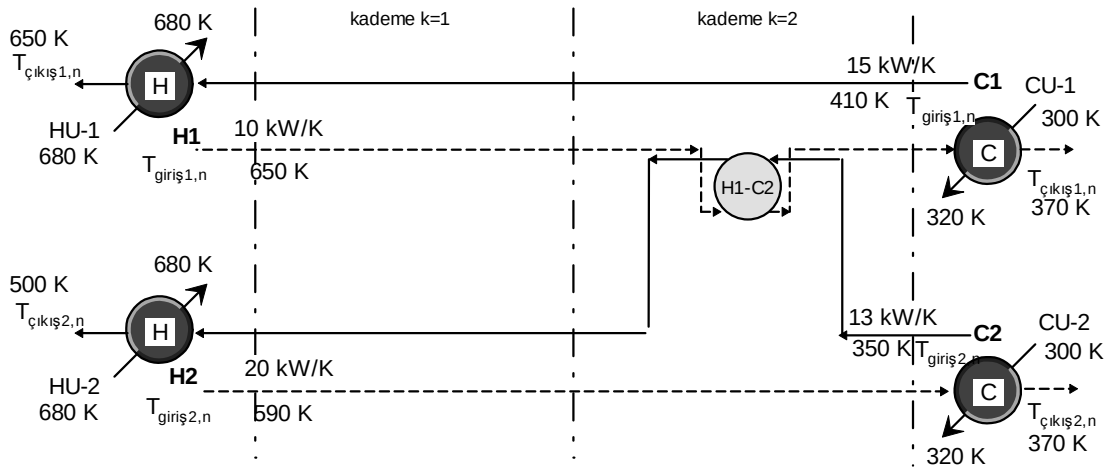


Şekil 6.17 P1D1-C4 Yapısı

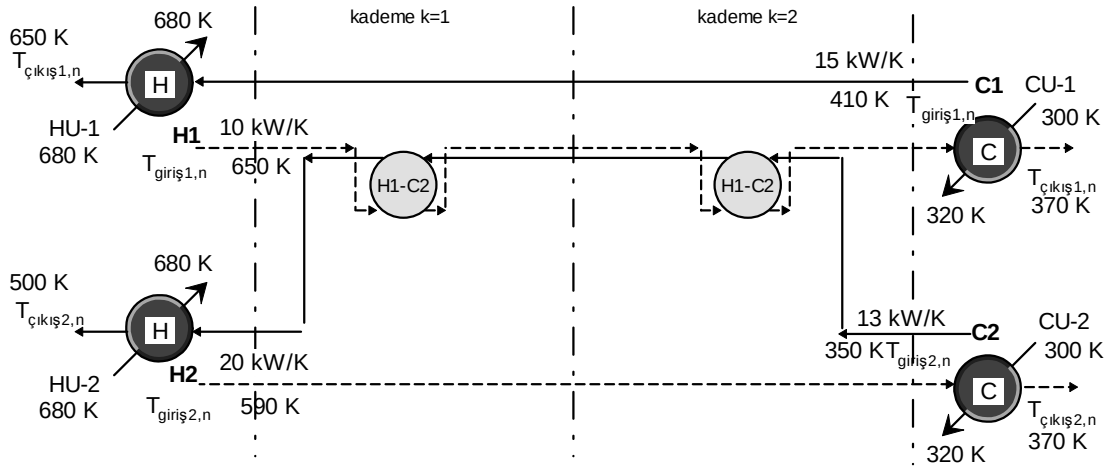
Dördüncü bölge 120 K 'den 150 K 'e kadar esneklik indeksini ve nominal çalışma koşullarında 8850 kW toplam işletme maliyetini göstermektedir. Bölge içinde P1D1-D1, P1D1-D2 ve P1D1-D3 yapıları bulunmaktadır. P1D1-D1 yapısı Şekil 6.18'de, P1D1-D2 yapısı Şekil 6.19'da ve P1D1-D3 yapısı Şekil 6.20'de gösterilmiştir. Yapıların ısıtma maliyetleri 3600 kW ve soğutma maliyetleri 5250 kW bulunmuştur. P1D1-D1 ve P1D1-D2 yapıları farklı ikili değişkenlerden oluşmasına rağmen birbirlerinin aynısıdır. Şekil 6.18 ve Şekil 6.19 incelendiğinde her iki yapının da iki ısıtıcı, iki soğutucu ve bir ısı değiştiriciden oluştuğu görülmektedir. Yapılarda bulunan H1-C2 ısı değiştiricisi süperyapının farklı kademelerinde bulunmaktadır. Bütün sıcak akımların çıkışlarında soğutucu ve bütün soğuk akımların çıkışlarında ise ısıtıcı bulunmaktadır.



Şekil 6.18 P1D1-D1 Yapısı



Şekil 6.19 P1D1-D2 Yapısı



Şekil 6.20 P1D1-D3 Yapısı

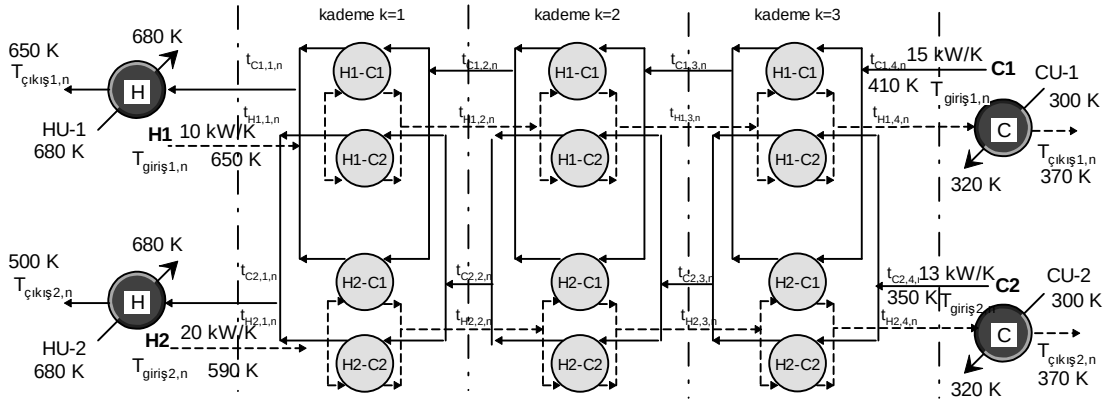
Durum Çalışması-1’de, istenilen esneklik indeksi değerine karşı bulunan, toplam işletme maliyeti seviyeleri, bu bölgeler içinde bulunan yapılar ve bu yapıların esneklik indeksi değerleri (δ^*) Tablo 6.4’de özetlenmiştir.

Tablo 6.4 Durum Çalışması-1 Sonucunda Bulunan Yapılar ve Esneklik İndeksleri

B	Yapılar	(δ^*)	B	Yapılar	(δ^*)
1	P1D1-A	36.95 K	2	P1D1-B8	90 K
2	P1D1-B1	90 K	3	P1D1-C1	120 K
	P1D1-B2	90 K		P1D1-C2	120 K
	P1D1-B3	90 K		P1D1-C3	120 K
	P1D1-B4	90 K		P1D1-C4	120 K
	P1D1-B5	70.63 K	4	P1D1-D1	150 K
	P1D1-B6	74.24 K		P1D1-D2	150 K
	P1D1-B7	74.24 K		P1D1-D3	150 K

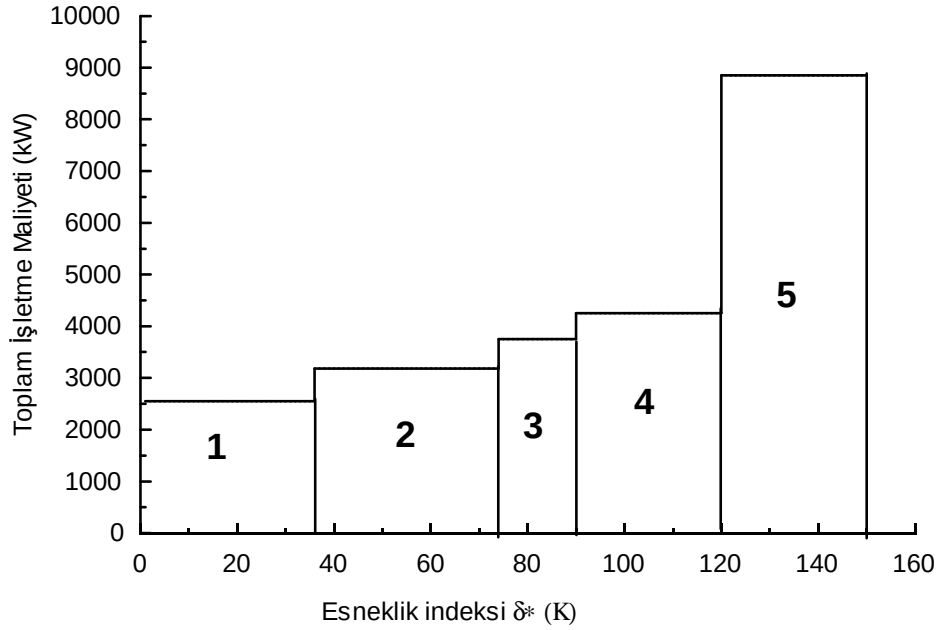
6.1.2. Durum Çalışması-2

Bu bölümdeki durum çalışmasında iki kademeli süperyapı üç kademeye çıkartılarak Problem-1'deki örnek ısı değiştirici ağı problemi üzerinde uygulanmıştır. Şekil 6.21 üç kademeye çıkartılmış süperyapıyı göstermektedir. Bu yapı incelendiğinde akımlar arasında ısı transferinin olabileceği muhtemel ısı değiştirici sayısının 12 olduğu görülmektedir. Bu durum çalışmasında da ısıtıcı, soğutucu ve ısı değiştiricilerin toplam sayısı Durum Çalışması-1'de olduğu gibi en fazla 6 ile sınırlandırılmıştır (Denklem 5.28).



Şekil 6.21 Üç Kademeli Süperyapı

Üç kademeli süperyapı için istenilen esneklik indeksinde enaz ütilite sarfiyatlı ısı değiştirici ağı yapısı sentezi, Beşinci Bölüm'de verilen MILP formülasyonu kullanılarak yapılmıştır. 0 K'den 150 K'e kadar istenilen esneklik indeksi (δ^*) değiştirilerek toplam işletme maliyetinin değişimi izlenmiştir. Şekil 6.22 toplam işletme maliyeti bölgelerinin istenilen esneklik indeksine (δ^*) göre değişimini göstermektedir.

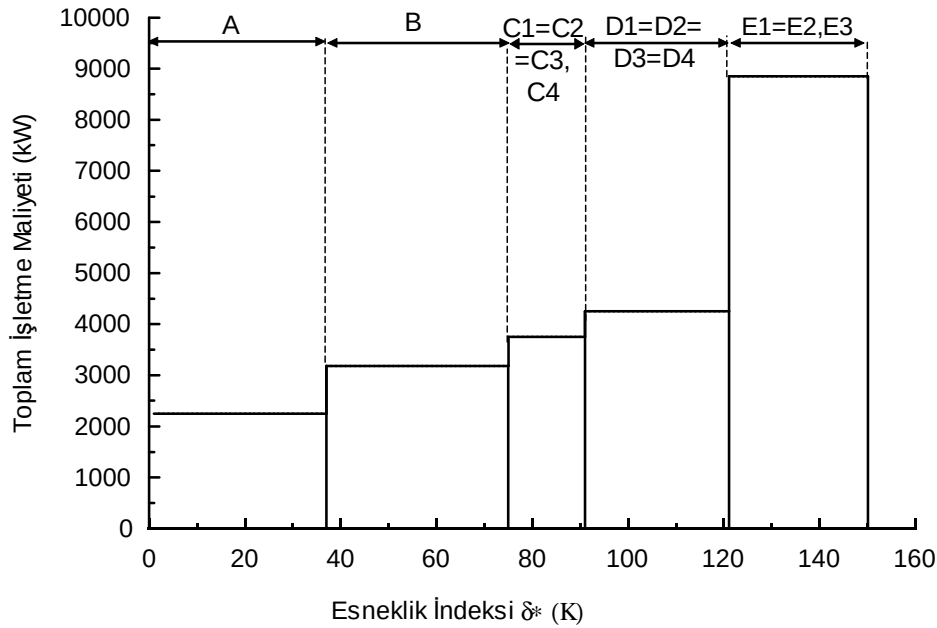


Şekil 6.22 Toplam İşletme Maliyetinin Esneklik İndeksine Göre Değişimi

Şekil 6.22’de beş farklı bölge görülmektedir. Birinci bölge 2550 kW’lık, ikinci bölge 3183.33 kW’lık, üçüncü bölge 3750 kW’lık, dördüncü bölge 4250 kW’lık ve beşinci bölge 8850 kW’lık toplam işletme maliyetlerini vermektedir.

Bu bölgeler içinde bir veya birden çok ısı değiştirici ağ yapısı bulunmuştur. Farklı ikili değişkenler ile oluşmalarına rağmen aslında aynı olan yapılar da görülmüştür.

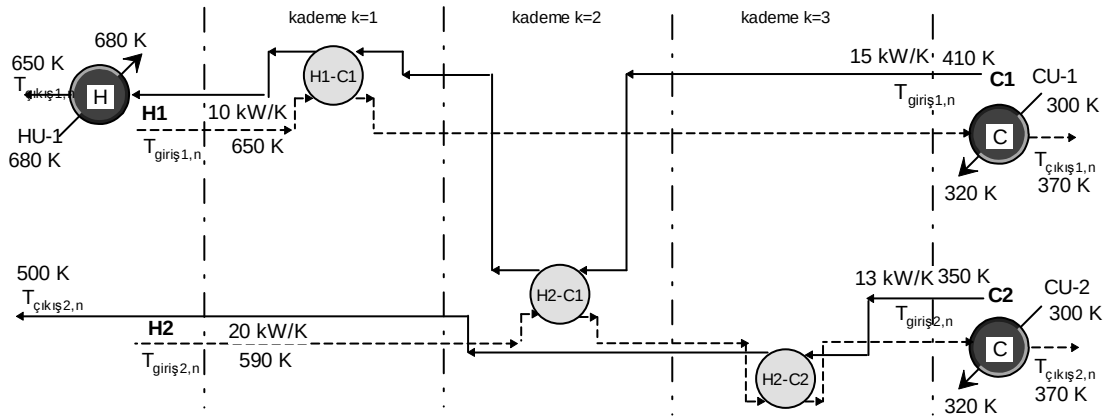
Şekil 6.23 Durum Çalışması-2 için istenilen esneklik miktarının değişimiyle toplam işletme maliyetinin değişimini, oluşan bölgeler içinde bulunan yapılarla birlikte vermektedir. Birinci bölge içinde bir yapı, ikinci bölge içinde sekiz yapı, üçüncü bölge içinde dört yapı ve son olarak dördüncü bölge içinde üç yapı gözlenmiştir.



Şekil 6.23 Nominal Çalışma Şartlarında A'dan E3'e Toplam İşletme Maliyetlerinin Esneklik İndeksine (δ^*) Göre Değişimi.

Birinci bölge toplam 2550 kW'lık toplam işletme maliyetini ve $0 \leq \delta^* \leq 36.95$ K esneklik indeksini göstermektedir. Bölge içinde bir yapıya rastlanmıştır (P1D2 A). Bu yapı Durum Çalışması-1'de ortaya çıkan P1D1-A yapısının aynısıdır ve aynı zamanda problemin pinch çözümü olan yapıdır.

İkinci bölge 3183.3 kW toplam işletme maliyetini ve $36.95 \leq \delta^* \leq 74.24$ K istenilen esneklik indeksini göstermektedir. Bu bölge içinde de tek bir yapı bulunmuştur (P1D2-B). P1D2-B yapısının toplam işletme maliyeti 3183.3 kW, ısıtma maliyeti 766.7 kW ve soğutma maliyeti 2416.7 kW'tır. İlginçtir ki 3183.3 kW'lık daha düşük maliyetli ara bölge ve içindeki P1D2-B yapısı Durum Çalışması-1'de iki kademeli çözümde gözlenememiştir (Şekil 6.24). Böyle bir ısı değiştirici ağı yapısının iki kademeli süperyapıda bulunabilmesi imkansızdır. Yee and Grossmann (1990) süperyapı kademe sayısını en çok sıcak veya soğuk akım sayısı olarak önermişlerdir. Fakat kademe sayısının bir artırılması ile daha düşük maliyetli bir bölge bulunmuştur. Süperyapı tabanlı ısı değiştirici ağı sentezi yapılırken kademe sayısının en çok sıcak veya soğuk akım sayısının bir fazlası olarak alınmasıyla, ortaya çıkmayan daha düşük maliyetli bir ara bölgenin ve yapının bulunduğu görülmektedir.



Şekil 6.24 P1D2-B Yapısı

Üçüncü bölge toplam 3750 kW'lık toplam işletme maliyetini ve $74.24 K \leq \delta^* \leq 90 K$ esneklik indeksini göstermektedir. 3750 kW toplam ütilite tüketimli bir bölge Durum Çalışması-1'de de bulunmuştu. Bölge içinde birbirinin aynı olan ve üç kademeli süper yapının farklı bölgelerinde görülen üç yapı (P1D2-C1= P1D2-C2= P1D2-C3) ve bir farklı yapı (P1D2-C4) bulunmuştur. P1D2-C1, P1D2-C2 ve P1D2-C3 yapıları Durum Çalışması-1'de elde edilen P1D1-B8 yapısının ve P1D1-C4 yapısı da P1D1-B1 yapısının aynısıdır.

Dördüncü bölge toplam 4250 kW'lık toplam işletme maliyetini ve $90 K \leq \delta^* \leq 120 K$ esneklik indeksini göstermektedir. Bölge içinde birbirinin aynı olan üç kademeli süper yapının farklı bölgelerinde görülen dört yapı (P1D2-D1= P1D2-D2= P1D2-D3= P1D2-D4) bulunmuştur. P1D2-D1, P1D2-D2, P1D2-D3 ve P1D2-D4 yapıları Durum Çalışması-1'de elde edilen P1D1-C1 yapısının aynısıdır.

Beşinci bölge toplam 8850 kW'lık toplam işletme maliyetini ve $120 K \leq \delta^* \leq 150 K$ esneklik indeksini göstermektedir. Bölge içinde birbirinin aynı olan üç kademeli süper yapının farklı bölgelerinde gözükten iki yapı (P1D2-E1= P1D2-E2) ve bir farklı yapı (P1D2-E3) bulunmuştur. P1D2-E1 ve P1D2-E2 yapıları Durum Çalışması-1'de elde edilen P1D1-D1 yapısının ve P1D2-E3 yapısı, P1D1-D3 yapısının aynısıdır.

Tablo 6.5 Durum Çalışması-2 sonucunda bulunan toplam işletme maliyeti seviyelerini, bu bölgeler içinde bulunan yapıları ve bu yapıların esneklik indekslerini (δ^*) vermektedir.

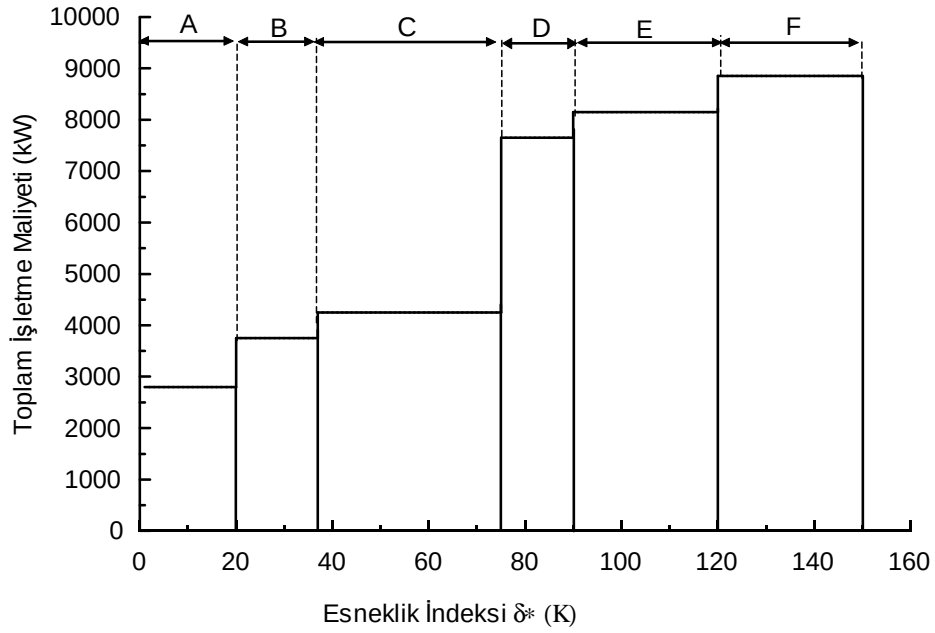
Tablo 6.5 Durum Çalışması-2 Sonucunda Bulunan Yapılar ve Esneklik İndeksleri

B	Yapılar	(δ^*)	B	Yapılar	(δ^*)
1	P1D2-A	36.95 K	4	P1D2-D2	120 K
2	P1D2-B	74.24 K		P1D2-D3	120 K
3	P1D2-C1	90 K		P1D2-D4	120 K
	P1D2-C2	90 K	5	P1D2-E1	150 K
	P1D2-C3	90 K		P1D2-E2	150 K
	P1D2-C4	90 K		P1D2-E3	150 K
4	P1D2-D1	120 K			

6.1.3 Durum Çalışması-3

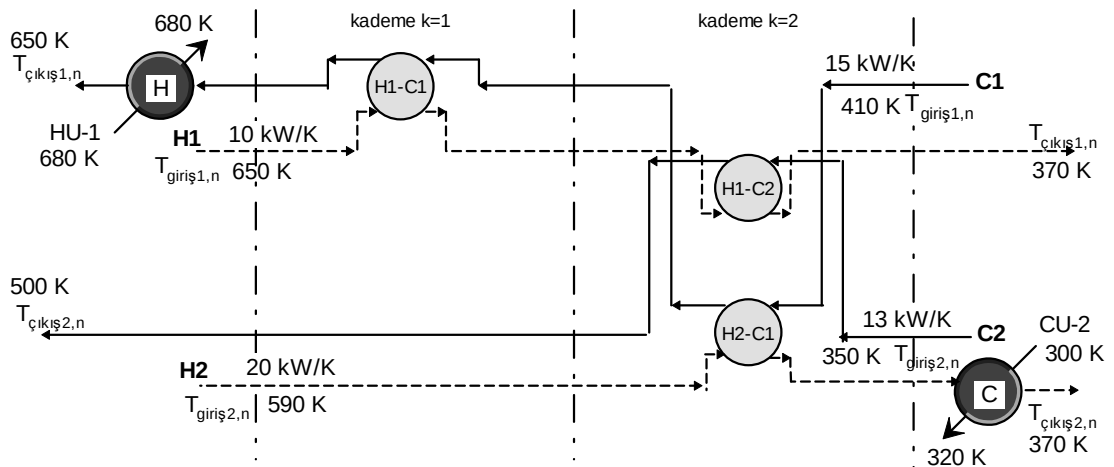
Bu bölümde Durum Çalışması-1 ve Durum Çalışması-2’den farklı olarak ençok ısı değiştirici sayısı 5 ile sınırlandırılmıştır. Çözüm için Durum Çalışması-1’de olduğu gibi iki kademeli süperyapı çözüm için kullanılmıştır. İstenilen esneklik indeksi 0 K’den 150 K’e kadar adım adım değiştirilerek toplam işletme maliyetinin değişimi izlenmiştir.

Şekil 6.25 toplam işletme maliyetinin istenilen esneklik indeksine (δ^*) göre değişimini göstermektedir. Şekil incelendiğinde 2800 kW, 3750 kW, 4250 kW, 7650 kW, 8150 kW ve 8850 kW olmak üzere altı farklı toplam ütilite tüketim bölgesinin bulunduğu görülmektedir. Her bölgede tek bir ısı değiştirici ağ yapısı tespit edilmiştir.



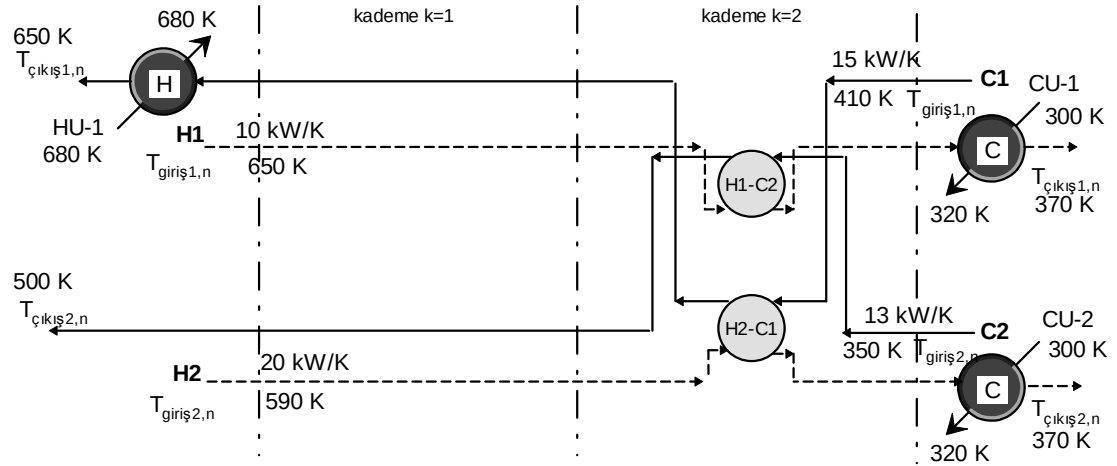
Şekil 6.25: Nominal Çalışma Şartlarında A'dan F'e Toplam İşletme Maliyetlerinin Esneklik İndeksine (δ^*) Göre Değişimi.

Birinci bölge 2800 kW'lık toplam işletme maliyetini ve 0 K'den 20 K'e kadar istenilen esneklik indeksini göstermektedir. Bölge içinde bulunan P1D3-A yapısının nominal çalışma koşullarında toplam işletme maliyeti 2800 kW, ısıtma maliyeti 575 kW ve soğutma maliyeti 2225 kW' tır (Şekil 6.26).



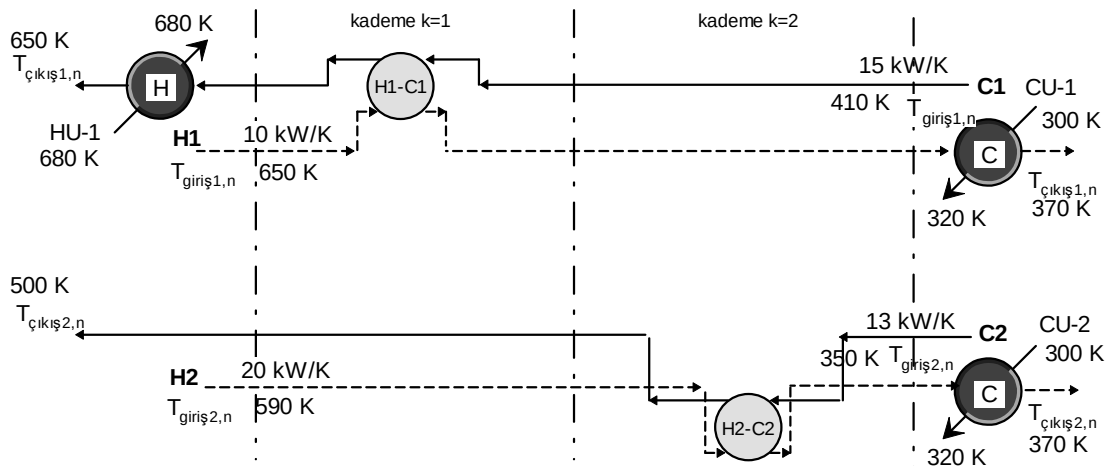
Şekil 6.26 P1D3-A Yapısı

İkinci bölge 3750 kW'lık toplam işletme maliyetini ve 20 K'den 36.95 K'e kadar istenilen esneklik indeksini göstermektedir. Bölge içinde P1D3-B yapısının toplam işletme maliyeti 3750 kW, ısıtma maliyeti 1050 kW ve soğutma maliyeti 2700 kW'tır (Şekil 6.27).



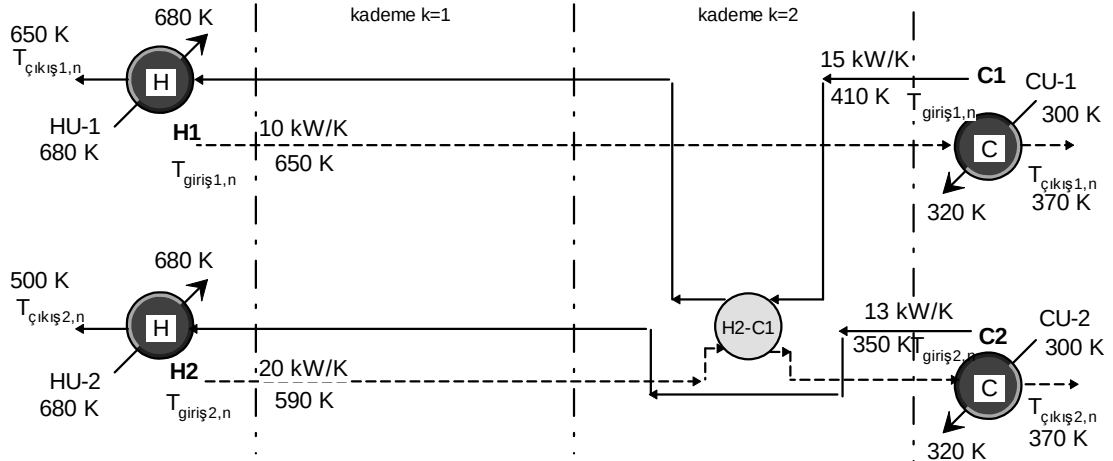
Şekil 6.27 P1D3-B Yapısı

Üçüncü bölge 4250 kW'lık toplam işletme maliyetini ve 36.95 K'den 74.24 K'e kadar istenilen esneklik indeksini göstermektedir. Bölge içinde P1D3-C yapısının toplam işletme maliyeti 4250 kW, ısıtma maliyeti 1300 kW ve soğutma maliyeti 2950 kW'tır (Şekil 6.28).



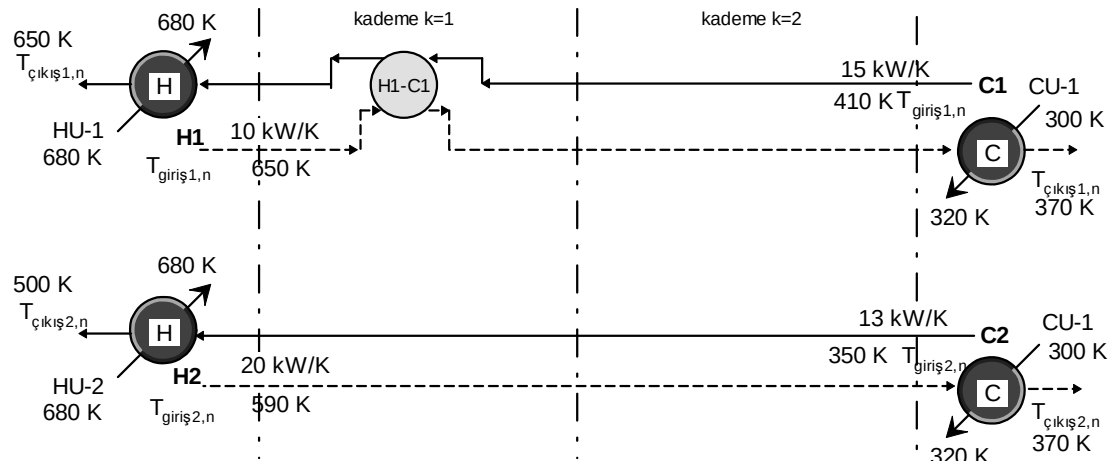
Şekil 6.28 P1D3-C Yapısı

Dördüncü bölge 7650 kW'lık toplam işletme maliyetini ve 74.25 K'den 90 K'e kadar istenilen esneklik indeksini göstermektedir. Bölge içinde bulunan P1D3-D yapısının toplam işletme maliyeti 7650 kW, ısıtma maliyeti 3000 kW ve soğutma maliyeti 4650 kW'tır (Şekil 6.29).



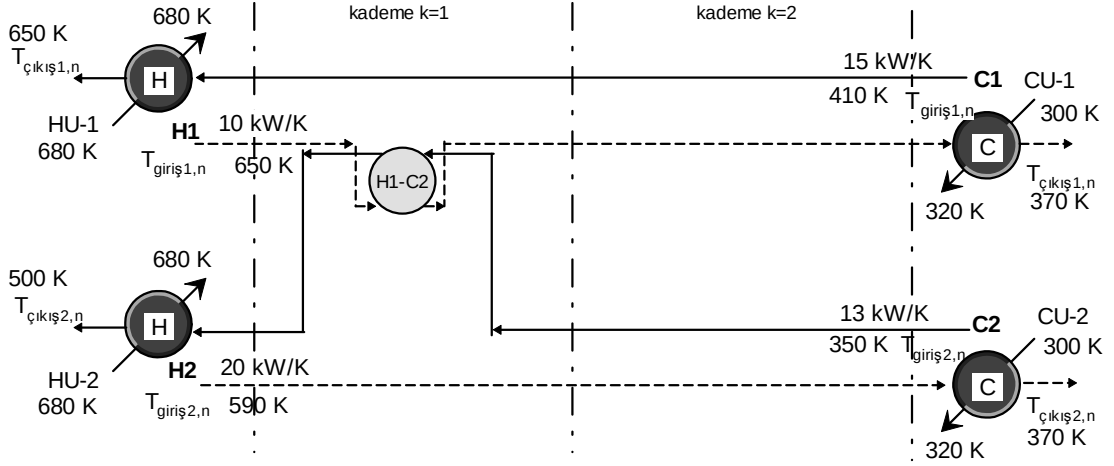
Şekil 6.29 P1D3-D Yapısı

Beşinci bölge 8150 kW'lık toplam işletme maliyetini ve 90 K'den 120 K'e kadar istenilen esneklik indeksini göstermektedir. Bölge içinde bulunan P1D3-E yapısının toplam işletme maliyeti 8150 kW, ısıtma maliyeti 3250 kW ve soğutma maliyeti 4900 kW'tır (Şekil 6.30).



Şekil 6.30 P1D3-E Yapısı

Altıncı bölge 8850kW'lık toplam işletme maliyetini ve 120 K'den 150 K'e kadar istenilen esneklik indeksini göstermektedir. Bölge içinde P1D3-F yapısının toplam işletme maliyeti 8850 kW, ısıtma maliyeti 3600 kW ve soğutma maliyeti 5250 kW'tır (Şekil 6.31).



Şekil 6.31 P1D3-F yapısı

Tablo 6.6 Durum Çalışması-3 sonucunda bulunan toplam işletme maliyeti seviyelerini, bu bölgeler içinde bulunan yapıları ve bu yapıların esneklik indekslerini (δ^*) vermektedir.

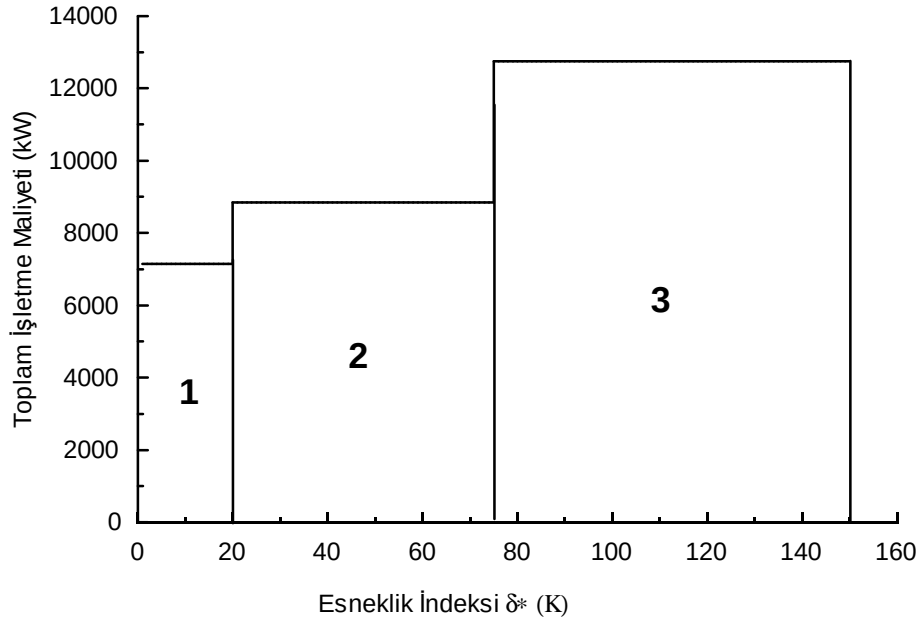
Tablo 6.6 Durum Çalışması-3 Sonucunda Bulunan Yapılar ve Esneklik İndeksleri

B	Yapılar	(δ^*)	B	Yapılar	(δ^*)
1	P1D3-A	20 K	4	P1D3-D	90 K
2	P1D3-B	36.95 K	5	P1D3-E	120 K
3	P1D3-C	74.24 K	6	P1D3-F	150 K

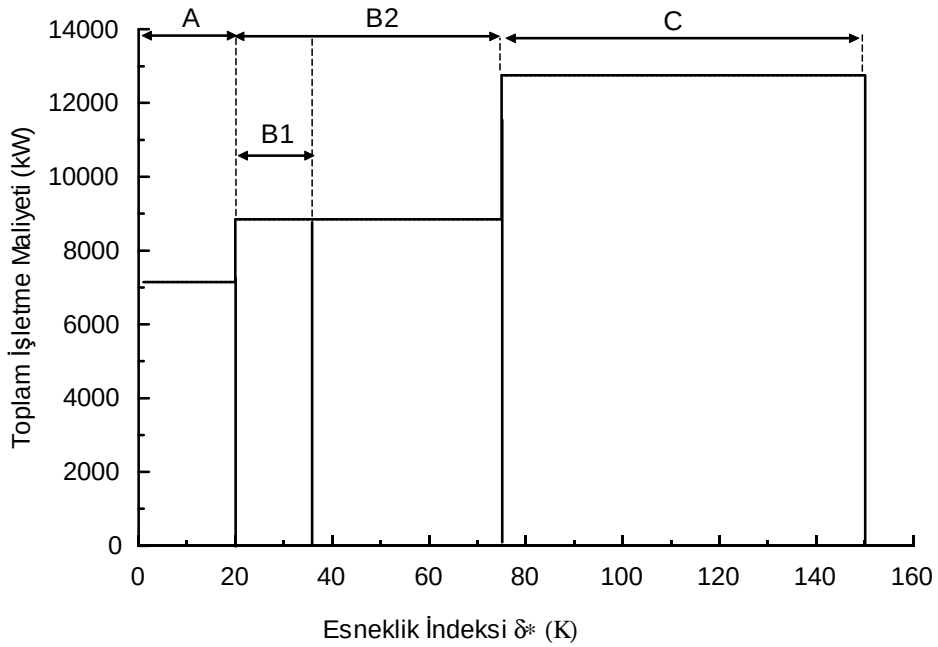
6.1.4 Durum Çalışması-4

Bu durum çalışmasında iki kademeli süperyapı için istenilen esneklik indeksinde enaz ütilite tüketimli ısı değiştirici ağlarının sentezini yapan MILP formülasyonunda ile en çok ısı değiştirici sayısı 4 ile sınırlandırılarak problemin çözümü yapılmıştır. İstenilen esneklik indeksi 0 K'den 150 K'e kadar adım adım

artırılarak toplam işletme maliyetinin değişimi gözlenmiştir. Şekil 6.32 toplam işletme maliyetinin istenilen esneklik indeksine göre değişimini vermektedir.



Şekil 6.32 Toplam İşletme Maliyetinin Esneklik İndeksine Göre Değişimi

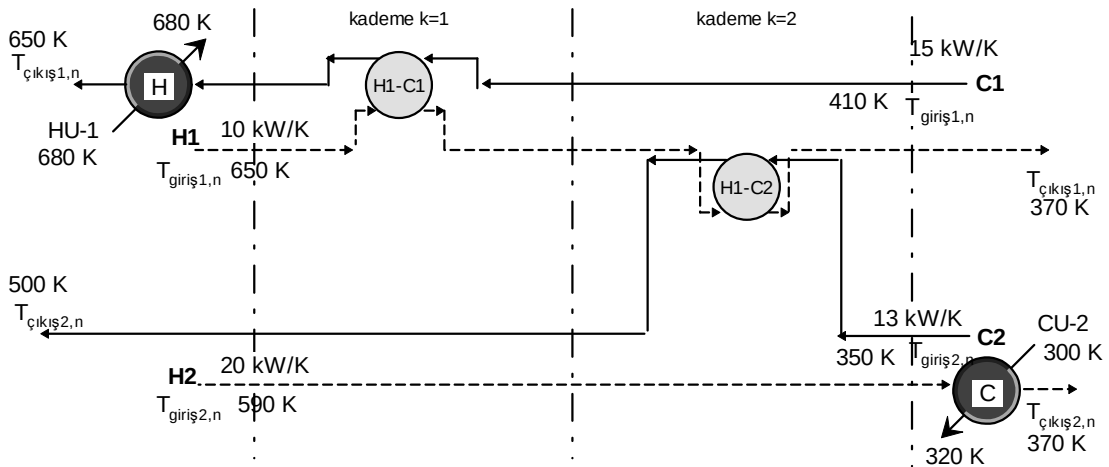


Şekil 6.33 Nominal Çalışma Şartlarında A'dan C'e Toplam İşletme Maliyetlerinin Esneklik İndeksine (δ^*) Göre Değişimi.

Şekil 6.32 incelendiğinde 7150 kW, 8850 kW ve 12750 kW olmak üzere toplam üç ütilite tüketim bölgesi bulunmuştur.

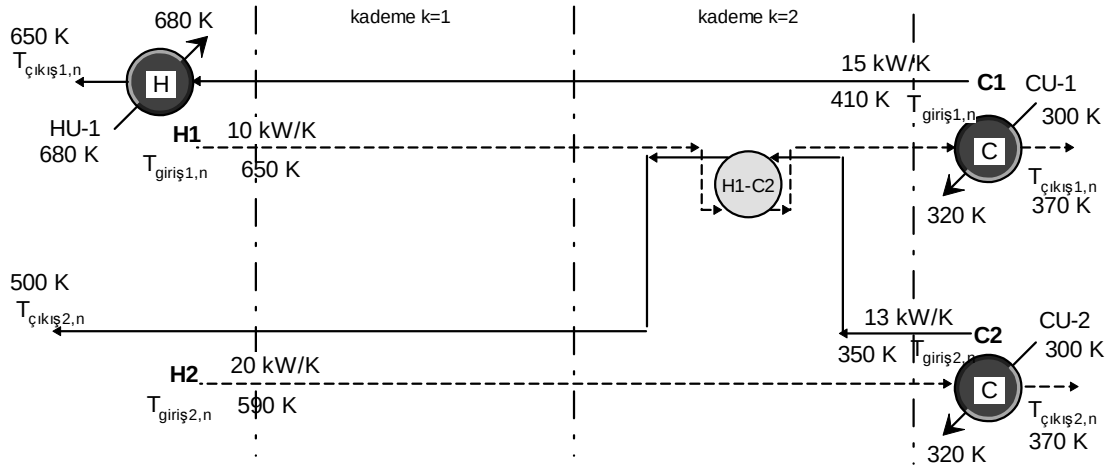
Şekil 6.33 Durum Çalışması-4 için istenilen esneklik miktarının değişimiyle toplam işletme maliyetinin değişimini ve oluşan bölgeler içinde bulunan yapıları da vermektedir.

Birinci bölge 7150 kW'lık toplam işletme maliyetini ve 0 K'den 20 K'e kadar istenilen esneklik indeksini göstermektedir. Bu bölge içinde tek bir yapı bulunmuştur (P1D4-A). P1D4-A yapısının nominal çalışma koşullarında toplam işletme maliyeti 7150 kW, ısıtma maliyeti 2750 kW ve soğutma maliyeti 4400 kW'tır (Şekil 6.34).

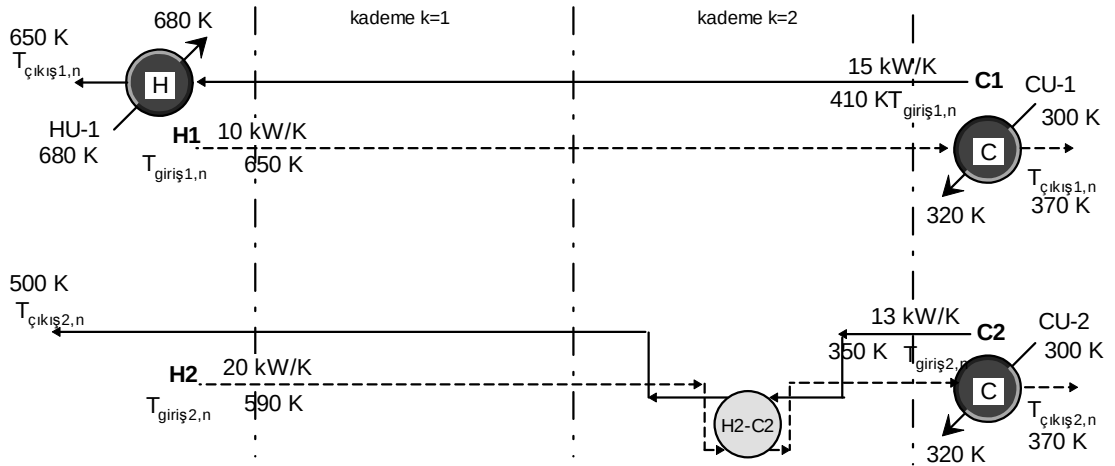


Şekil 6.34 P1D4-A Yapısı

İkinci bölge nominal çalışma koşullarında toplam 8850 kW işletme maliyetini ve 20 K'den 74.24 K'e kadar istenilen esneklik indeksini göstermektedir. Bölge içinde iki farklı yapı bulunmuştur (P1D4-B1, P1D4-B2). Şekil 6.35 P1D4-B1 yapısını, Şekil 6.36 P1D4-B2 yapısını göstermektedir. Yapıların ısıtma maliyeti 3600 kW, soğutma maliyetleri ise 5250 kW' tır.

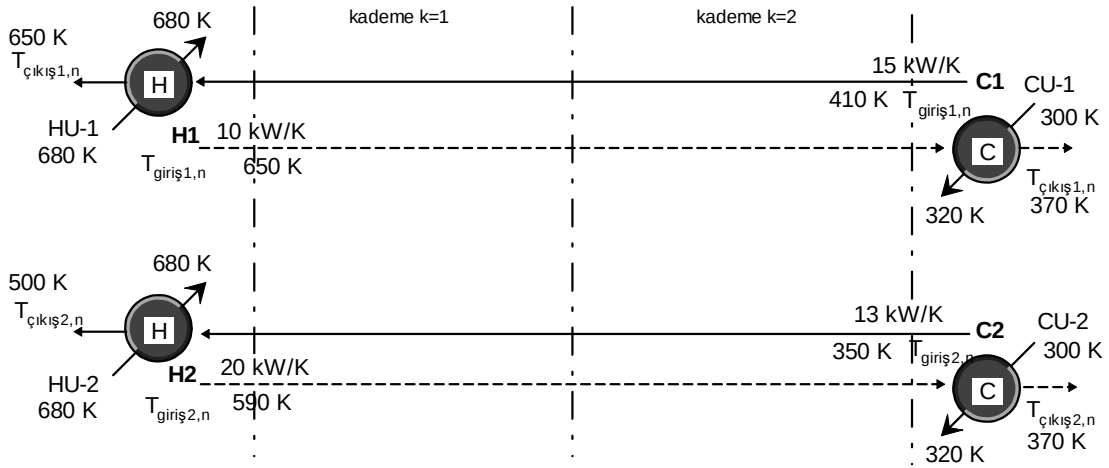


Şekil 6.35 P1D4-B1 Yapısı



Şekil 6.36 P1D4-B2 Yapısı

Üçüncü bölge nominal çalışma koşullarında 12750 kW'lık işletme maliyetini ve 120 K'den 150 K'e kadar istenilen esneklik indeksini göstermektedir. Bölge içinde bir yapı bulunmuştur (P1D3-C). P1D4-C yapısı Şekil 6.37'da gösterilmiştir. Yapının ısıtma maliyeti 5550 kW, soğutma maliyeti 7200 kW'dır.



Şekil 6.37 P1D4-C Yapısı

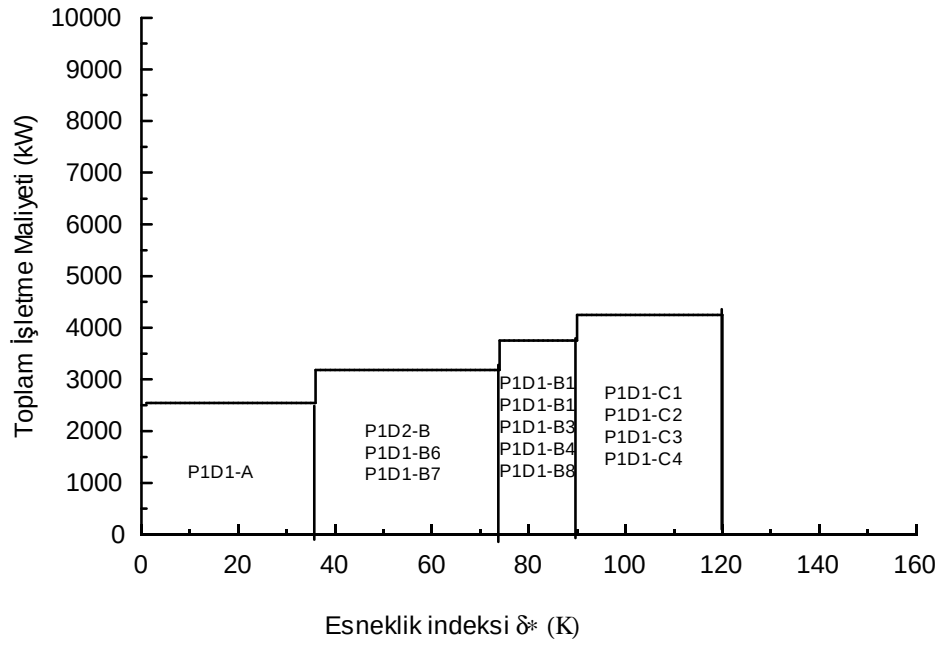
Tablo 6.7 Durum Çalışması-4 sonucunda bulunan toplam işletme maliyeti seviyelerini, bu bölgeler içinde bulunan yapıları ve bu yapıların esneklik indekslerini (δ^*) vermektedir.

Tablo 6.7 Durum Çalışması-4 Sonucunda Bulunan Yapılar ve Esneklik İndeksleri

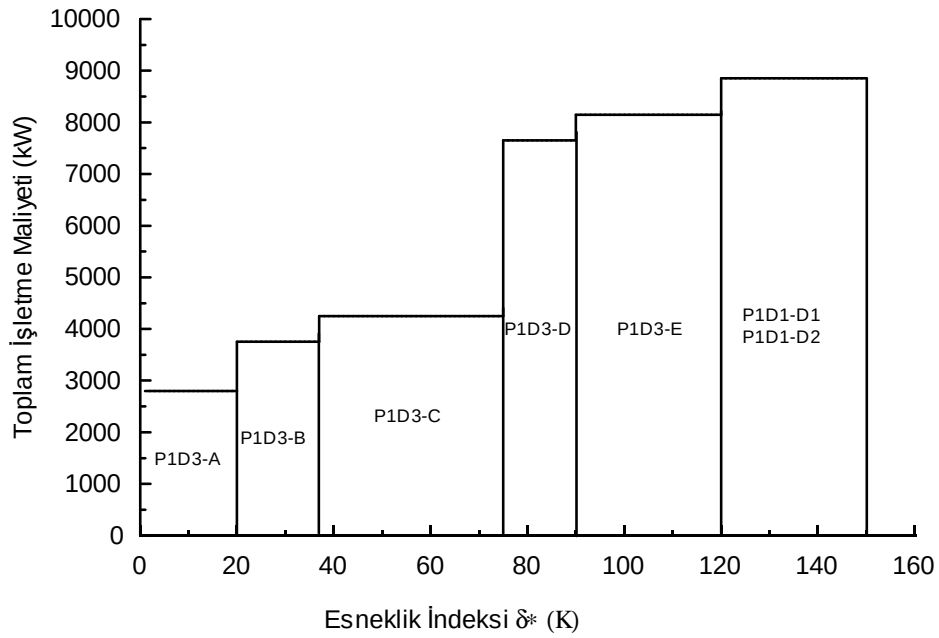
B	Yapılar	(δ^*)	B	Yapılar	(δ^*)
1	P1D4-A	20 K	2	P1D4-B2	74.24
2	P1D4-B1	36.95	3	P1D4-C	150

6.1.5 Durum Çalışmalarının Isı Değiştirici Sayısına Göre Değerlendirilmesi

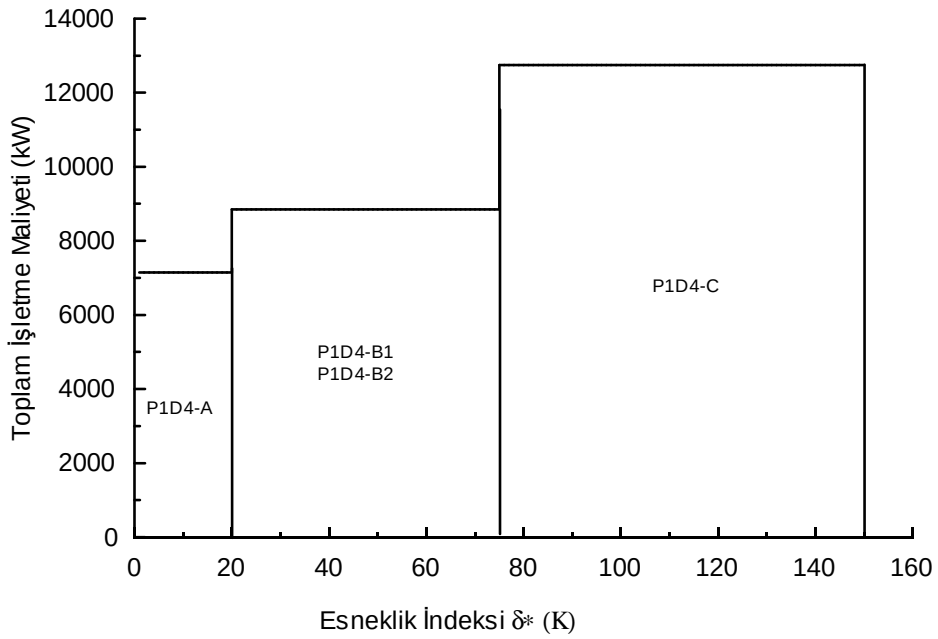
Bu bölümde, Problem-1 için yapılan durum çalışmalarında istenilen esneklik indeksi için elde edilen toplam işletme maliyeti seviyeleri ve bu seviyeler içinde bulunan ısı değiştirici ağ grupları, ihtiva ettikleri ısı değiştirici sayıları bakımından incelenmiştir. Altı ısı değiştiricili ağ grupları, istenilen esneklik indeksi için işletme maliyeti seviyeleri ile birlikte Şekil 6.38’de, beş ısı değiştiricili ağ grupları, istenilen esneklik indeksi için işletme maliyeti seviyeleri ile birlikte Şekil 6.39’da, dört ısı değiştiricili ağ grupları, istenilen esneklik indeksi için işletme maliyeti seviyeleri ile birlikte Şekil 6.40’da verilmiştir.



Şekil 6.38 Problem-1 İçin Altı Isı Değiştiricili Yapılar



Şekil 6.39 Problem-1 İçin Beş Isı Değiştiricili Yapılar



Şekil 6.40 Problem-1 İçin Dört Isı Değiştiricili Yapılar

Isı değiştirici ağlarının toplam maliyeti; ütilite maliyetlerinden, ısı değiştiricilerin alanlarından gelen yatırım maliyetinden ve ağıdaki ısı değiştirici sayısından gelen yatırım maliyetinden oluşmaktadır. Bu çalışmada ütilite maliyetinin istenilen esneklik miktarı için enazlanması amaçlanmıştır. Bu bölümde verilen şekiller aynı istenilen esneklik indeksi değerleri için değişik ısı değiştirici sayılarından oluşan ağlar arasındaki ütilite tüketim seviyeleri arasındaki farkları vermektedir. Şekiller incelendiğinde ağ sentezinde bulunan yapıların ısı değiştirici sayıları düştükçe ütilite tüketim seviyelerinin arttığı bulunmuştur. Ayrıca ısı değiştirici sayıları düşürüldükçe ve istenilen esneklik miktarları artırıldıkça, ısı değiştirici ağında bulunan ısı değiştirici sayıları azalmakta, sıcak ve soğuk akımları istenilen sıcaklıklara ulaştırabilmek için, enerji transferi daha çok kontrol elemanları olan ısıtıcı ve soğutucularda olmaktadır. Bu yüzden ısı değiştirici ağının işletme maliyeti yükselmekte fakat kontrol edilebilirliği artmaktadır.

6.1.6 Problem-1'in Durum Çalışmalarının Değerlendirilmesi

Tablo 6.8 Problem-1 için yapılan durum çalışmaları sonucunda istenilen esneklik indeksi değişimi ile toplam işletme maliyeti seviyelerinin nasıl değiştiğini vermektedir.

Tablo 6.8 Değişik Durum Çalışmalarında Toplam İşletme Maliyeti Seviyelerinin İstenilen Esneklik İndeksine Göre Değişimi (Problem-1)

	0 - 20	20 - 36.95	36.95-74.24	74.24 - 90	90 - 120	120 - 150
2 Kademeli 6 ID'li Çözüm	2550		3750		4250	8850
3 Kademeli 6 ID'li Çözüm	2550		3183.3	3750	4250	8850
2 Kademeli 5 ID'li Çözüm	2800	3750	4250	7650	8150	8850
2 Kademeli 4 ID'li Çözüm	7150	8850		12750		

Durum Çalışması-1'de iki kademeli süperyapı için en çok ısı değiştirici sayısı 6 olarak sınırlandırılarak Problem-1 çözüldüğünde dört farklı bölge bulunmuştur.

Durum Çalışması-2'de ısı değiştirici sayısı Durum Çalışması-1'deki değer alınmış ve kademe sayısı üçe çıkarılmıştır. Çözüm sonucunda Durum Çalışması-1'den farklı olarak daha düşük işletme maliyetli bir ara bölge ve bu bölge içinde tek bir yapı bulunmuştur. Bahsedildiği gibi bu yapıya iki kademeli çözümde ulaşmak olanaksızdır.

Durum Çalışması-3'de iki kademeli süperyapı için ısı değiştirici sayısı pinch yönteminin önerdiği en az toplam ısı değiştirici sayısının altında tutulmuştur. Farklı işletme maliyetlerinde altı bölge ve bu bölgeler içinde birer yapı bulunmuştur. Durum Çalışması-1 ve Durum Çalışması-2'de aynı istenilen esneklik indeksi aralıkları için bulunan bölgelerden daha yüksek maliyetli bölgeler bulunmuştur.

Durum Çalışması-4’de iki kademeli süperyapı için ençok ısı değıştirici sayısı 4 ile sınırlandırılarak daha da düşürölmüş ve üç farklı bölge bulunmuştur. Durum Çalışması-1, Durum Çalışması-2 ve Durum Çalışması-3’de aynı istenilen esneklik indeksi aralıkları için bulunan bölgelerden daha yüksek maliyetli bölgeler bulunmuştur.

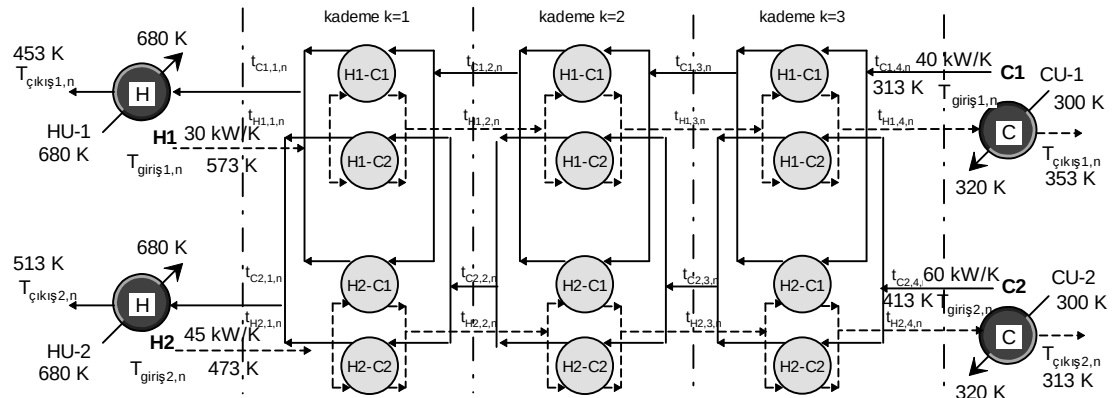
Durum Çalışmaları sonuçları incelendiğinde kademe sayısının artırılması ile daha düşük maliyetli bir ara bölge ve iki kademeli çözümde bulunması olanaksız tek bir ısı değıştirici ağı yapısı gözlenmiştir. Isı değıştirici sayısının azaltılmasıyla aynı esneklik aralıklarında daha yüksek maliyetli bölgeler ve bu bölgeler içinde daha yüksek maliyetli yapı grupları bulunmuştur.

6.2 Problem-2

Kotjabasakis and Linnhoff'un (1986) esnek ısı değıştirici ağıları sentezi ile ilgili 'Aşağı Akım Patikaları' yöntemini açıkladıkları örnek probleminin (Bölüm 3) MILP formülasyonu ile, besleme akım sıcaklıklarında her yönde olabilecek bozucu etkiler için, toplam işletme maliyeti enazlanacak şekilde çözümü yapılmıştır. Problem üç kademeli, iki kademeli, ençok 7 ısı değıştiricili, ençok 6 ısı değıştiricili ve ençok 5 ısı değıştiricili süperyapılar için çözülmüştür. Toplam işletme maliyetinin istenilen esneklik indeksine göre değışimi incelenmiştir. Problem Tablo 3.1'de tanımlandığı gibidir.

6.2.1 Durum Çalışması-1

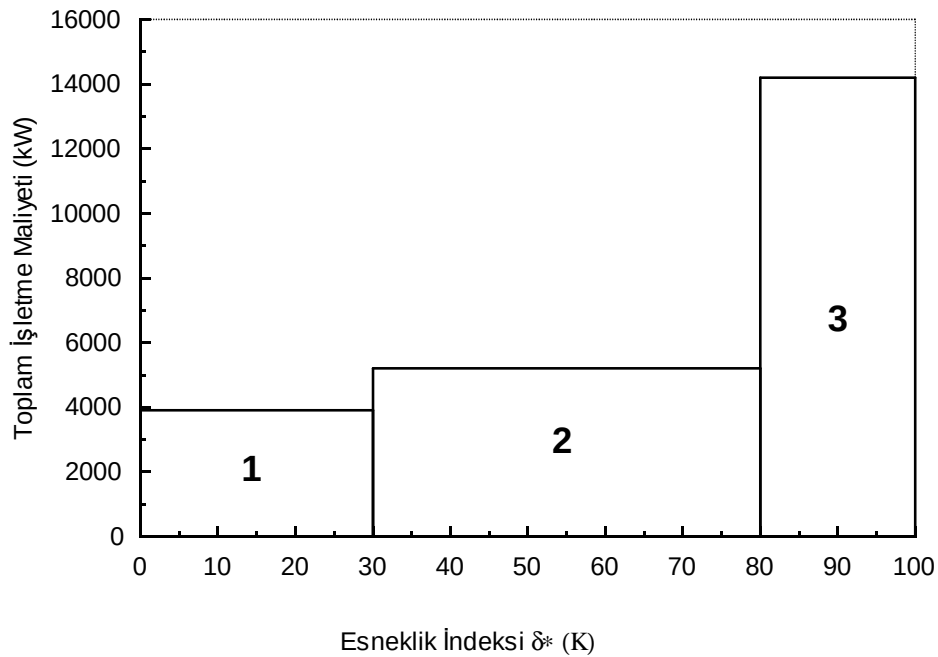
Bu durum çalışmasında problem üç kademeli süperyapı için incelenmiştir. Muhtemel yapıların ençok ısı değıştirici sayısı 7 ile sınırlandırılmıştır (Denklem 5.28). Şekil 6.41 üç kademeye çıkartılmış süperyapıyı ve problem için akım verilerini göstermektedir.



Şekil 6.41 İkinci Problem İçin Üç Kademeye Çıkarılmış Süperyapı ve Akım Verileri

İkinci soğuk akımın giriş sıcaklığı 313 K ve çıkış sıcaklığı 413 K'dir. Bu yüzden esneklik indeksinin alabileceği en çok değer 100 K'dir. Esneklik indeksi (δ^*) 0 K'den 100 K'e kadar artırılarak toplam işletme maliyetinin değişimi gözlenmiştir. Esneklik indeksi arttıkça toplam işletme maliyetinin de basamak basamak arttığı bulunmuştur.

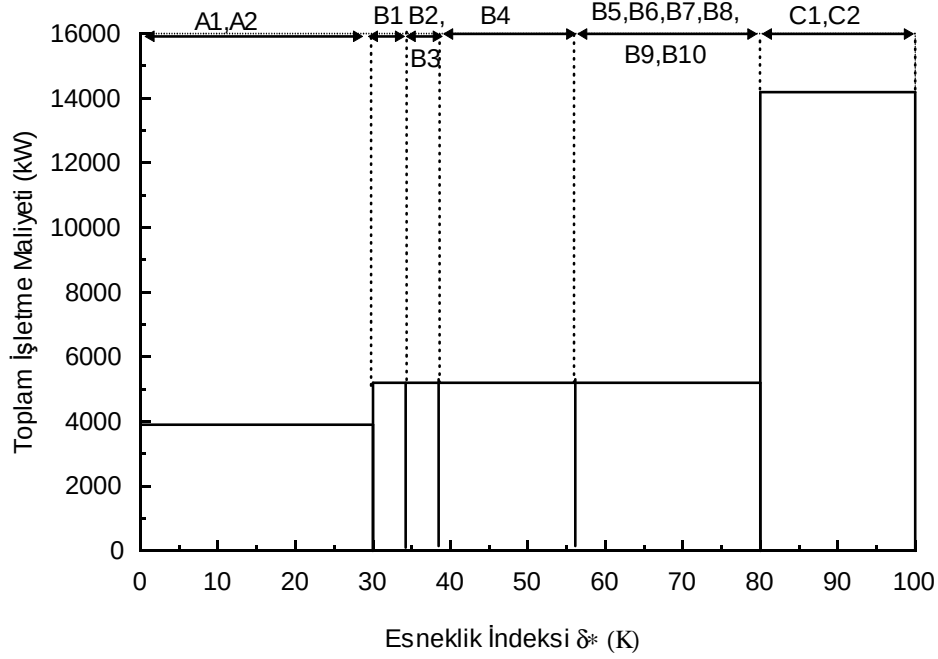
Şekil 6.42 istenilen esneklik miktarı değişimi ile toplam işletme maliyetinin değişimini göstermektedir. Şekil incelendiğinde toplam işletme maliyeti için üç farklı bölge gözlenmiştir. Birinci bölge 0 K ile 30 K arasında esneklik indeksini ve 3900 kW toplam işletme maliyetini, ikinci bölge 30 K ile 80 K arasında esneklik indeksini ve 5200 kW toplam işletme maliyetini, üçüncü bölge 80 K ile 100 K arasında esneklik indeksini ve 14200 kW toplam işletme maliyetini göstermektedir.



Şekil 6.42 Toplam İşletme Maliyetinin Esneklik İndeksine Göre Değişimi

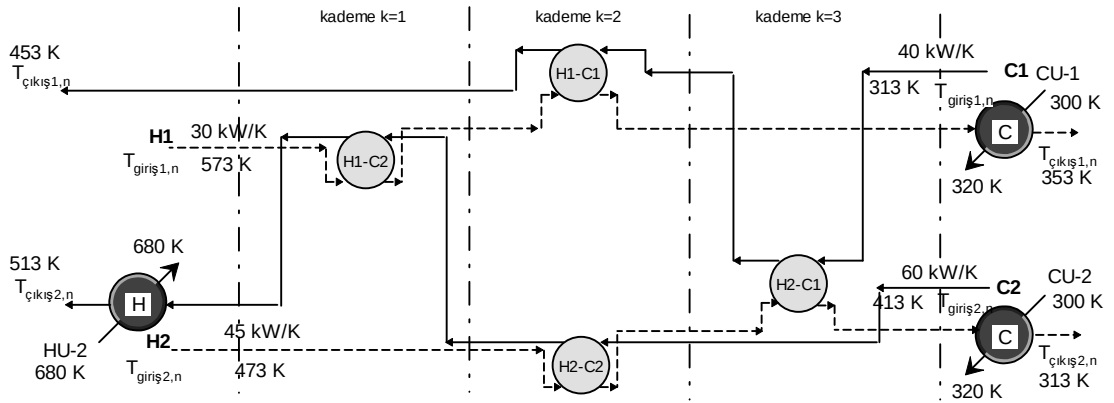
Bu bölgeler içinde bir veya birden çok ısı değiştirici ağ yapıları bulunmuştur. Farklı ikili değişkenler ile oluşmalarına rağmen aslında aynı olan yapılar burada da görülmüştür. Farklı ikili değişkenlerden oluşan ve gerçekten farklı olan ve yapılan çözümler sonucunda, nominal çalışma koşullarında aynı işletme maliyeti ile, aynı esneklikte veya farklı esnekliklerde çalışan yapılar bulunmuştur.

Şekil 6.43 nominal çalışma koşullarında üç kademeli, ençok 7 ısı değiştiricili çözüm için toplam işletme maliyetinin istenilen esneklik indeksine göre değişimini ve oluşan bölgeler içinde bulunan yapıları da vermektedir. Birinci bölge içinde iki yapı, ikinci bölge içinde on yapı, üçüncü bölge içinde iki yapı bulunmuştur. Problemin pinch çözümünde toplam 7 ısı değiştirici bulunmuştur.

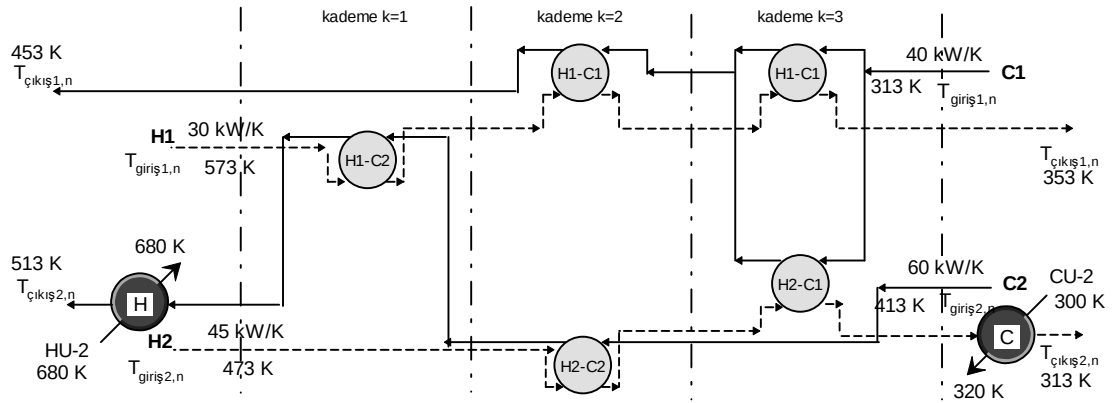


Şekil 6.43 Nominal Çalışma Koşullarında A1'den C2'e Toplam İşletme Maliyetlerinin Esneklik İndeksine (δ^*) Göre Değişimi

Birinci bölge $0 K \leq \delta^* \leq 30 K$ aralığını ve 3900 kW'lık toplam işletme maliyetini göstermektedir. Bölge içinde P2D1-A1 ve P2D1-A2 yapıları bulunmuştur. Her iki yapının da ısıtma maliyeti 850 kW, soğutma maliyeti 3050 kW ve toplam işletme maliyeti 3900 kW'tır. Şekil 6.44 P2D1-A1, Şekil 6.45 P2D1-A2 yapısını göstermektedir. P2D1-A1 yapısı aynı zamanda Kotjabasakis and Linnhoff'un (1986) inceledikleri ısı değiştirici ağ probleminde pinch yöntemi ile bulunan yapıdır.

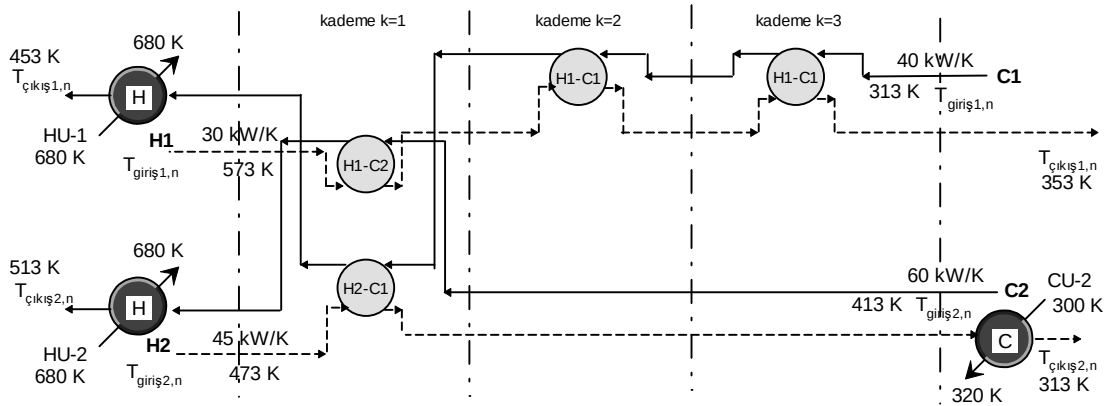


Şekil 6.44 P2D1-A1 Yapısı

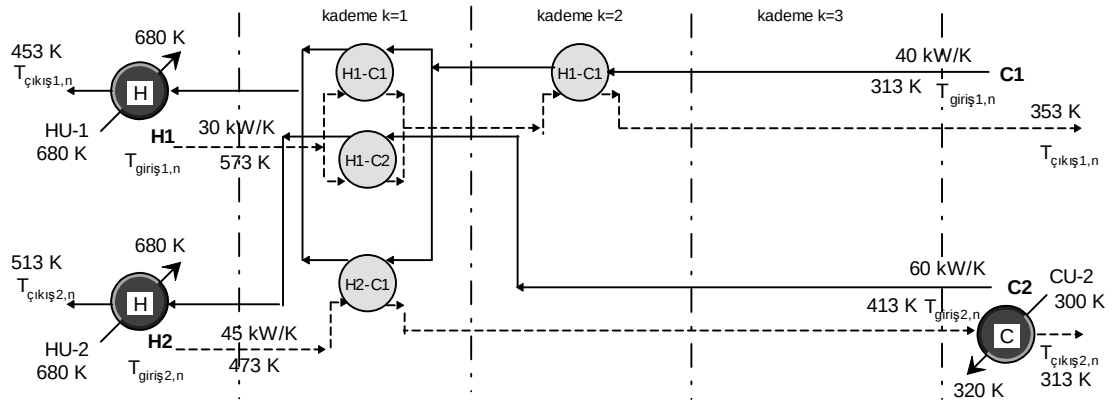


Şekil 6.45 P2D1-A2 Yapısı

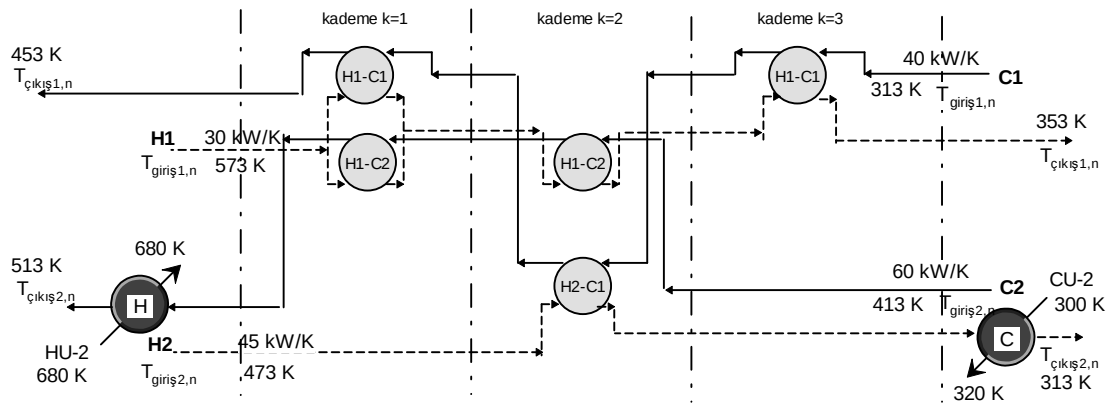
İkinci bölge içinde P2D1-B1 (Şekil 6.46), P2D1-B2 (Şekil 6.47), P2D1-B3 (Şekil 6.48), P2D1-B4 (Şekil 6.49), P2D1-B5 (Şekil 6.50), P2D1-B6 (Şekil 6.51), P2D1-B7 (Şekil 6.52), P2D1-B8 (Şekil 6.53), P2D1-B9 (Şekil 6.54) ve P2D1-B10 (Şekil 6.55) yapıları bulunmuştur. Yapıların hepsinin ısıtma maliyeti 1500 kW, soğutma maliyeti 3700 kW ve toplam işletme maliyeti 5200 kW'tır.



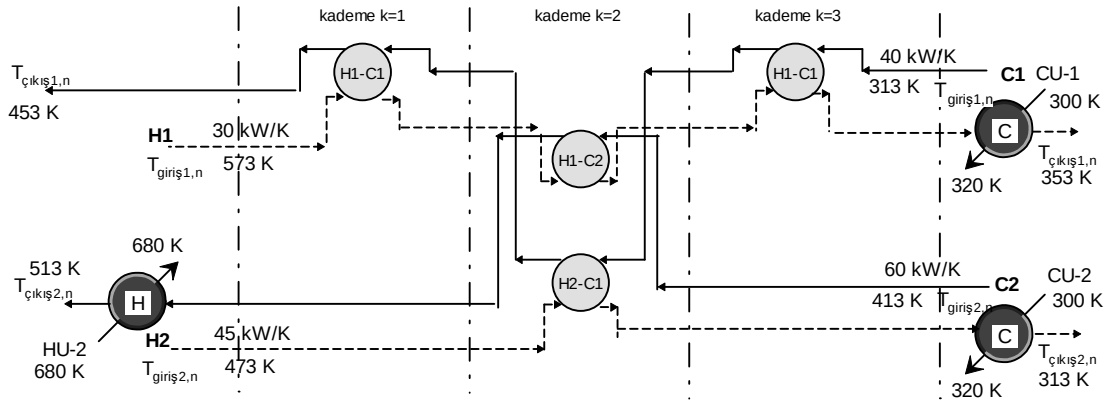
Şekil 6.46 P2D1-B1 Yapısı



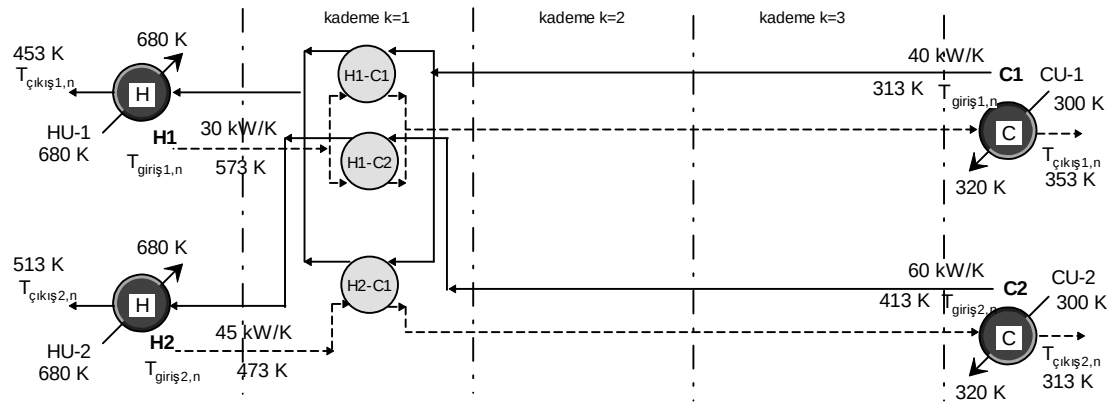
Şekil 6.47 P2D1-B2 Yapısı



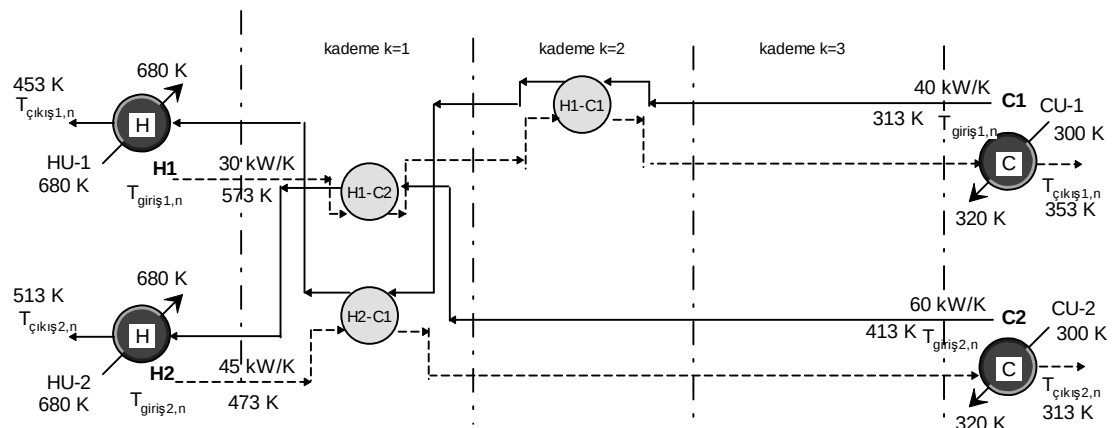
Şekil 6.48 P2D1-B3 Yapısı



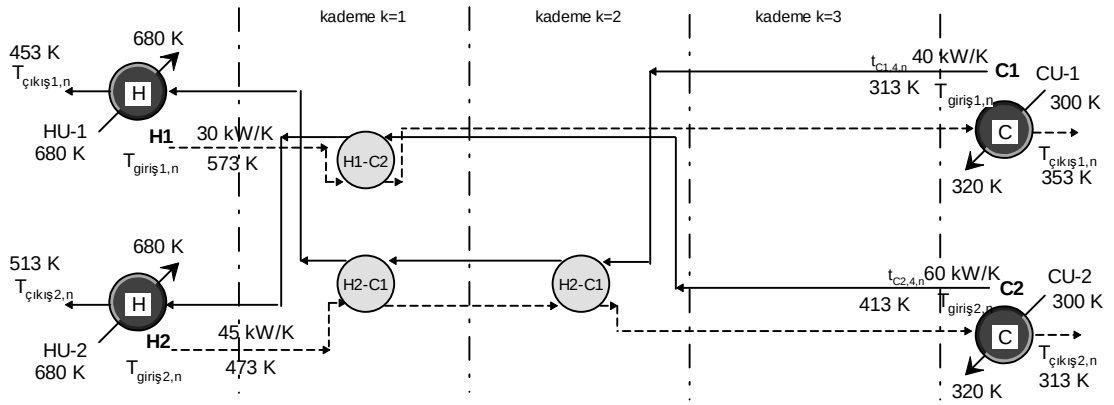
Şekil 6.49 P2D1-B4 Yapısı



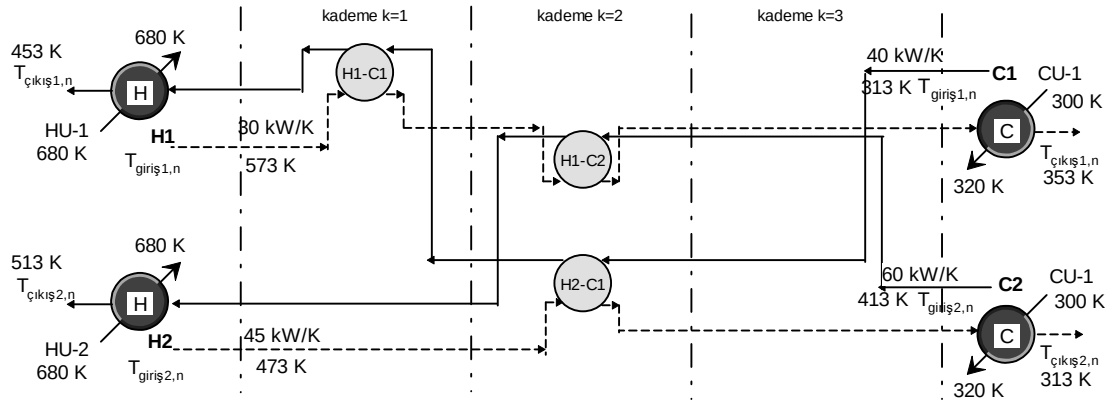
Şekil 6.50 P2D1-B5 Yapısı



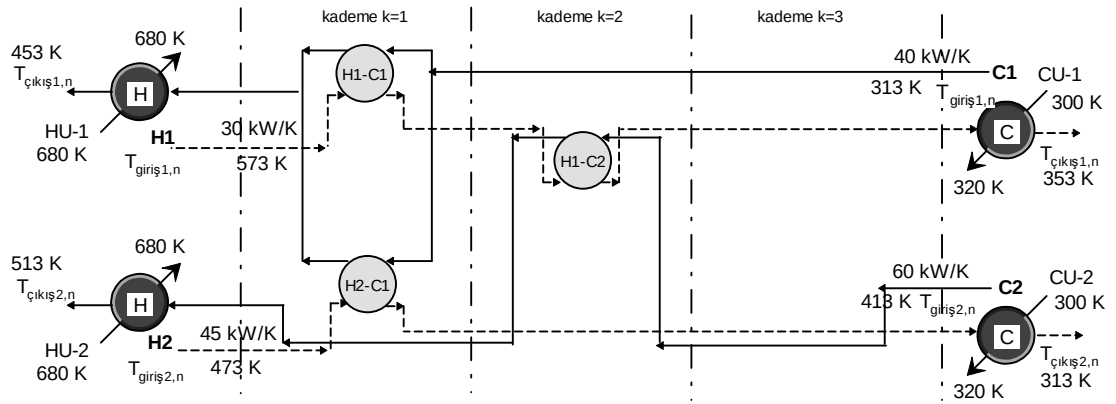
Şekil 6.51 P2D1-B6 yapısı



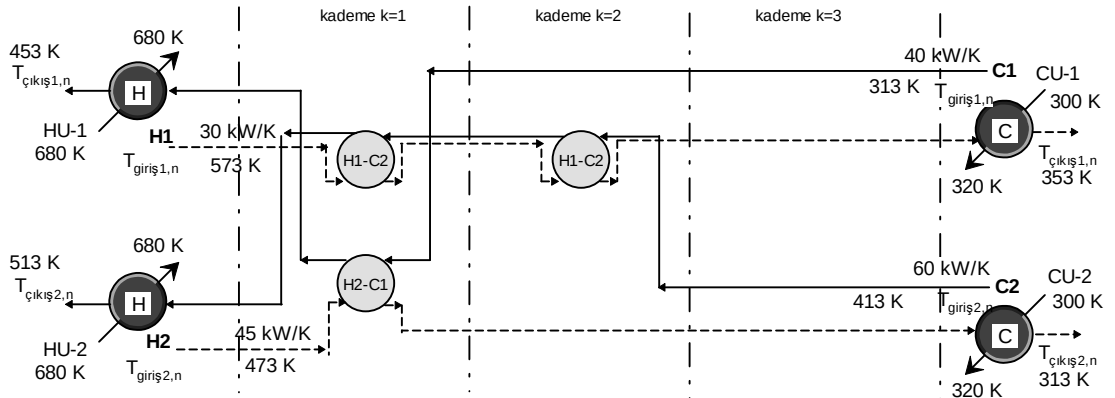
Şekil 6.52 P2D1-B7 Yapısı



Şekil 6.53 P2D1-B8 Yapısı

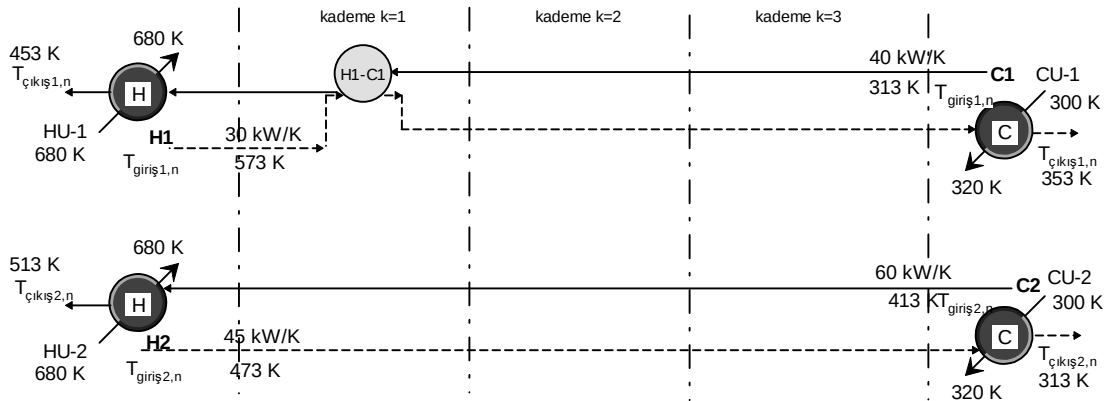


Şekil 6.54 P2D1-B9 yapısı

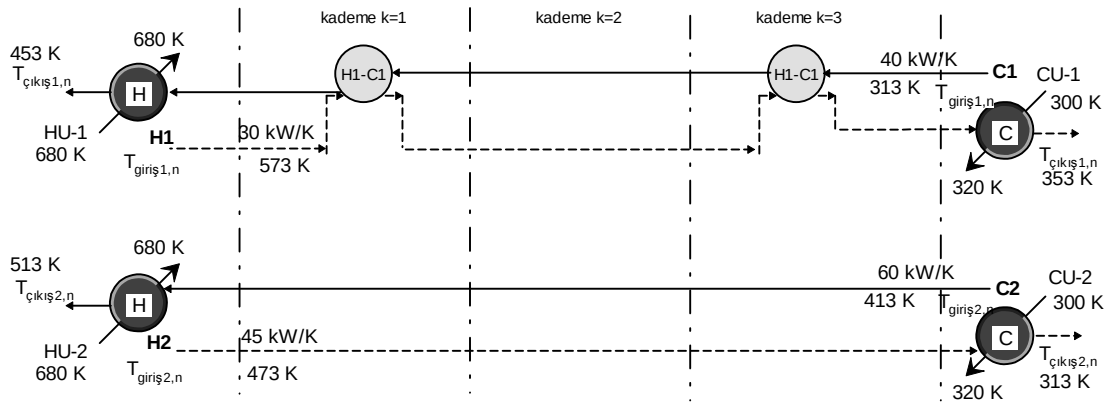


Şekil 6.55 P2D1-B10 Yapısı

Üçüncü bölge içinde birbirinden farklı iki yapı bulunmuştur (P2D1-C1, P2D1-C2) (Şekil 6.56, Şekil 6.57). Her iki yapının da ısıtma maliyeti 6000 kW, soğutma maliyeti 8200 kW ve toplam işletme maliyetleri 14200 kW'tır.



Şekil 6.56 P2D1-C1 Yapısı



Şekil 6.57 P2D1-C2 Yapısı

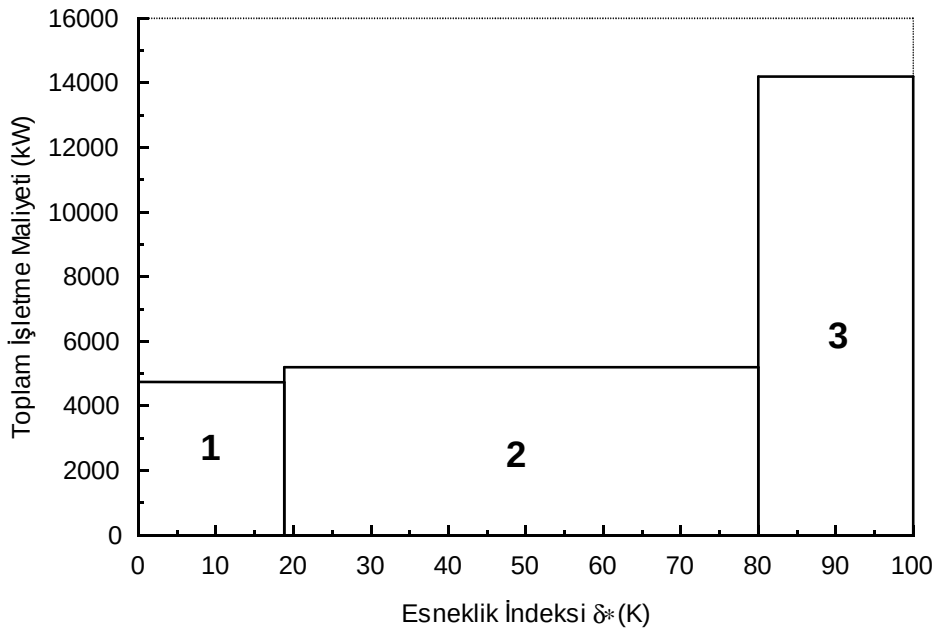
Tablo 6.9 Durum Çalışması-1 sonucunda bulunan toplam işletme maliyeti seviyelerini, bu bölgeler içinde bulunan yapıları ve bu yapıların esneklik indekslerini (δ^*) vermektedir.

Tablo 6.9 Durum Çalışması-1 Sonucunda Bulunan Yapılar ve Esneklik İndeksleri

B	Yapılar	(δ^*)	B	Yapılar	(δ^*)
1	P2D1-A1	30 K	2	P2D1-B6	80 K
	P2D1-A2	30 K		P2D1-B7	80 K
2	P2D1-B1	34.11 K		P2D1-B8	80 K
	P2D1-B2	38.46 K		P2D1-B9	80 K
	P2D1-B3	38.46 K		P2D1-B10	80 K
	P2D1-B4	56 K	3	P2D1-C1	100 K
	P2D1-B5	80 K		P2D1-C2	100 K

6.2.2 Durum Çalışması-2

Esneklik kriterini içine alan MILP formülasyonu bu durum çalışmasında üç kademeli süperyapı ve en çok 6 ısı değiştiricili sistem için kullanılmıştır. İstenilen esneklik indeksi 0 K'den 100 K'e kadar değiştirilmiş ve toplam işletme maliyetinin değişimi gözlenmiştir. Şekil 6.58 toplam işletme maliyetinin istenilen esneklik indeksine göre değişimini göstermektedir.

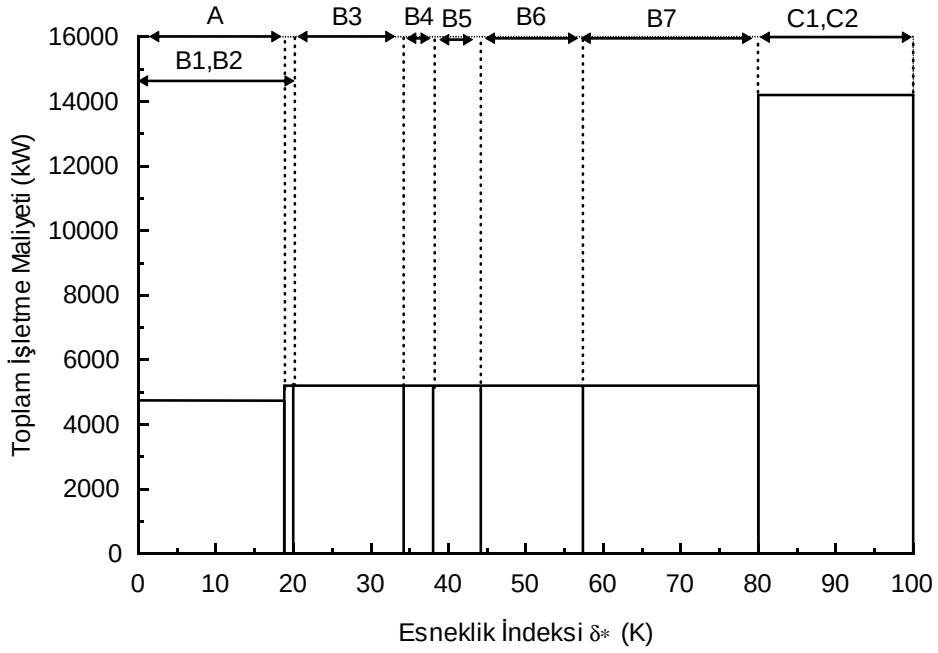


Şekil 6.58 Toplam İşletme Maliyetinin Esneklik İndeksine Göre Değişimi

Şekil 6.58 üç farklı bölgeyi göstermektedir. Birinci bölge 4750 kW'lık, ikinci bölge 5200 kW'lık, üçüncü bölge 14200 kW'lık vermektedir.

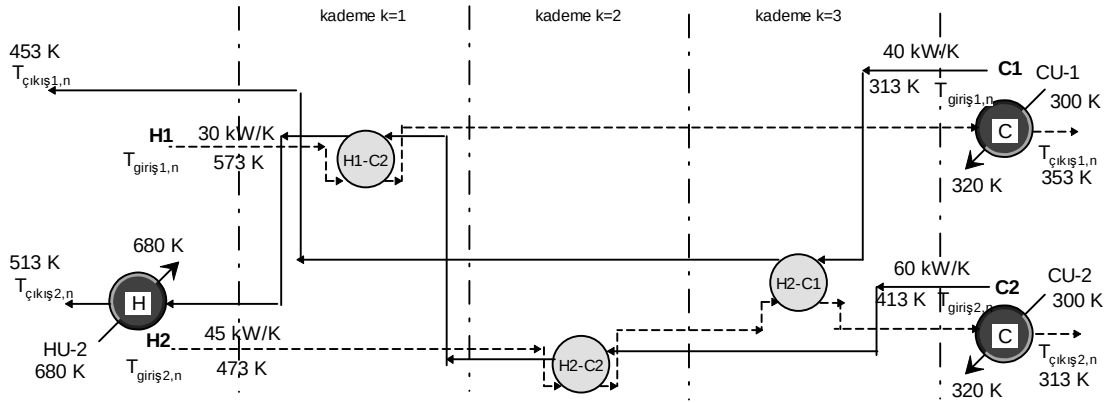
Bu bölgelerin içinde bir veya birden çok ısı değiştirici ağ yapısı bulunmuştur. Farklı ikili değişkenler ile oluşmalarına rağmen aslında aynı olan yapılar görülmüştür. Farklı ikili değişkenlerden oluşan ve gerçekten farklı olan ve yapılan çözümler sonucunda nominal çalışma koşullarında aynı işletme maliyeti ile aynı esneklikte veya farklı esnekliklerde çalışan yapılar bulunmuştur.

Şekil 6.59 Durum Çalışması-2 için istenilen esneklik miktarının değişimiyle toplam işletme maliyetinin değişimini ve oluşan bölgeler içinde bulunan yapıları da vermektedir. Birinci bölge içinde tek bir yapı, ikinci bölge içinde yedi yapı ve üçüncü bölge içinde iki yapı bulunmuştur.



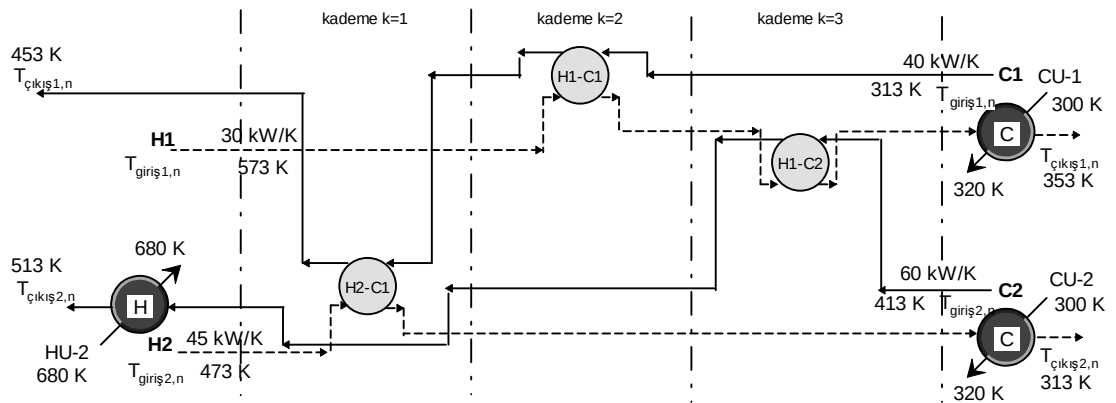
Şekil 6.59 Nominal Çalışma Koşullarında A'dan C2'e Toplam İşletme Maliyetlerinin Esneklik İndeksine (δ^*) Göre Değişimi

Birinci bölge içinde 0 K'den 18.82 K'e kadar besleme akım sıcaklıklarında olabilecek değişimlere dayanabilecek P2D2-A yapısı bulunmuştur (Şekil 6.60). Bu yapı Kotjabasakis and Linnhoff'un (1986) daha esnek ısı değiştirici ağ yapılarına ulaşmak için geliştirdikleri 'Aşağı Akım Patikaları' yöntemini uygularken önerdikleri tasarım değişiklikleri için, dördüncü ısı değiştiricinin kaldırıldığı yapıdır. Bulunan bu yapı problemin pinch çözümünden elde edilen yapıdan daha fazla ısıtma ve soğutma ihtiyacı gerektirmekte ve besleme akım sıcaklıklarında meydana gelebilecek değişimleri daha az oranda karşılayabilmektedir. Yapının ısıtma maliyeti 1275 kW, soğutma maliyeti 3475 kW ve toplam işletme maliyeti 4750 kW'tır.

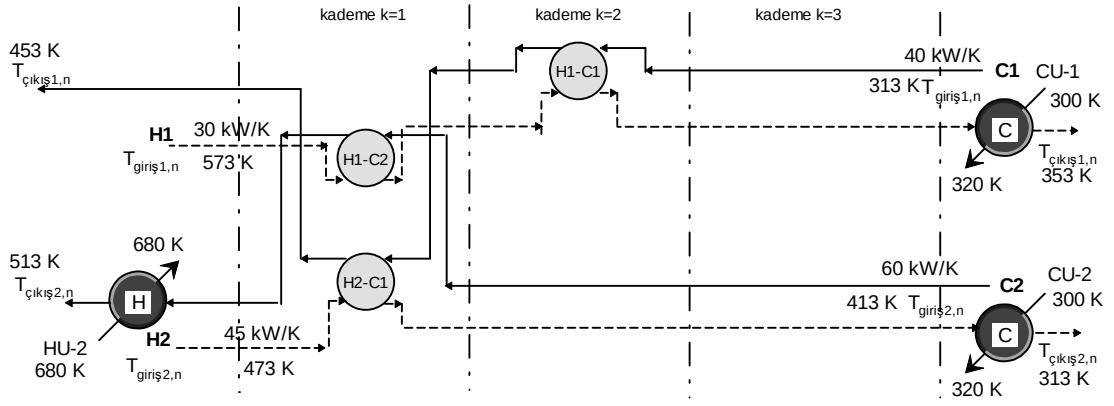


Şekil 6.60 P2D2-A yapısı

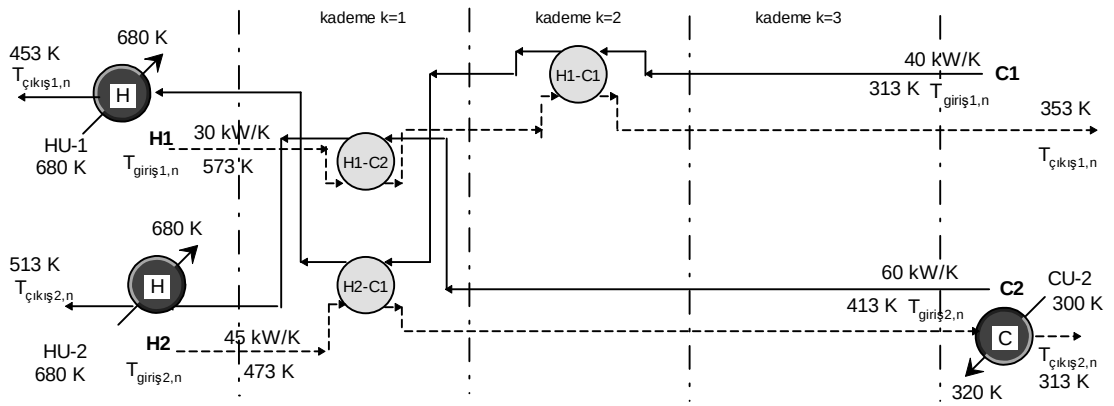
İkinci bölge içinde P2D2-B1, P2D2-B2, P2D2-B3, P2D2-B4, P2D2-B5, P2D2-B6 ve P2D2-B7 yapıları bulunmuştur. Yapıların hepsinin ısıtma maliyeti 1500 kW, soğutma maliyeti 3700 kW ve toplam işletme maliyeti 5200 kW'tır ve tüm sıcak akımların çıkışlarında soğutucular bulunmaktadır.



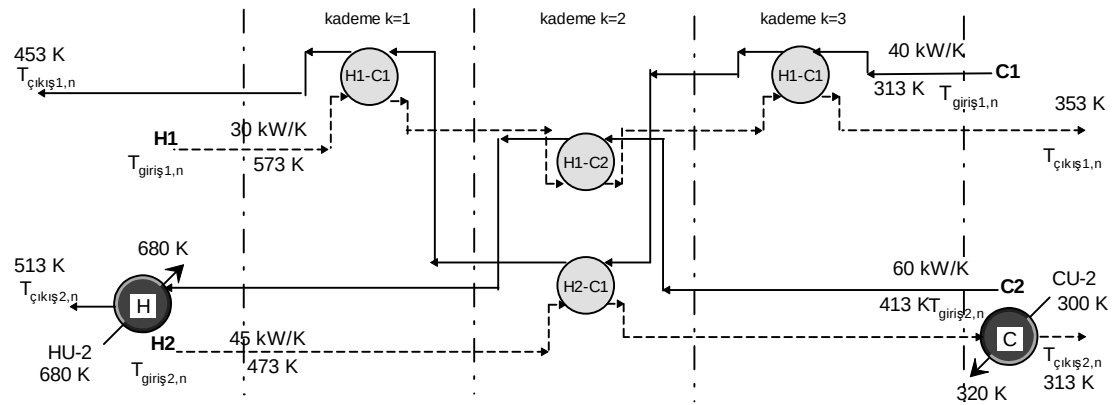
Şekil 6.61 P2D2-B1 Yapısı



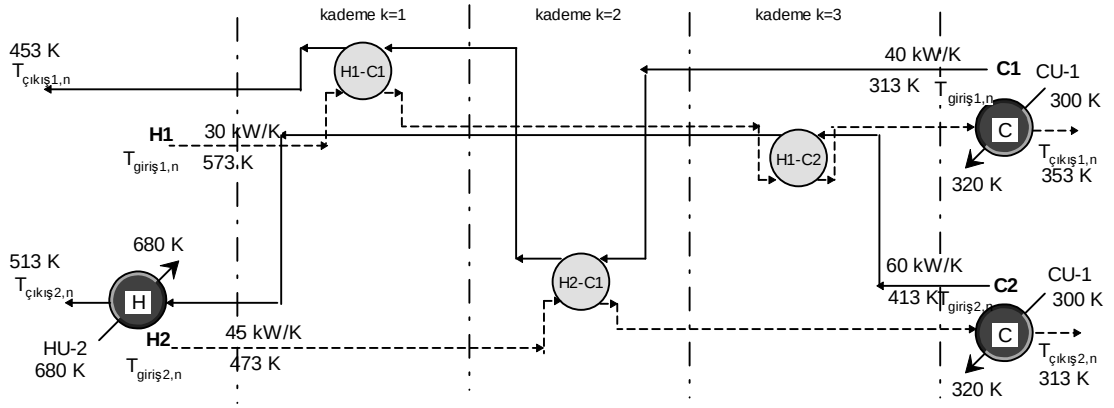
Şekil 6.62 P2D2-B2 Yapısı



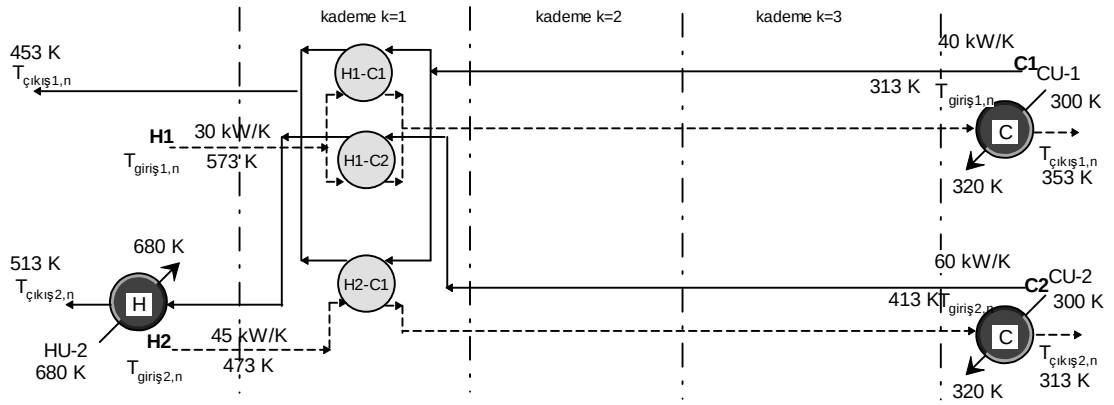
Şekil 6.63 P2D2-B3 Yapısı



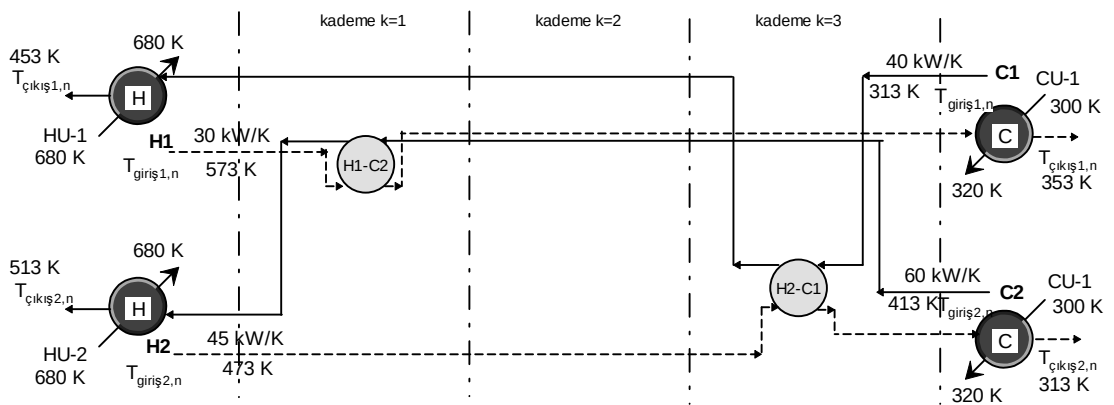
Şekil 6.64 P2D2-B4 Yapısı



Şekil 6.65 P2D2-B5 Yapısı



Şekil 6.66 P2D2-B6 Yapısı



Şekil 6.67 P2D2-B7 Yapısı

Üçüncü bölge içinde 0 K'den 100 K'e kadar besleme akım sıcaklıklarında olabilecek değişimlere dayanabilecek P2D2-C1 ve P2D2-C2 yapıları bulunmuştur. P2D2-C1 yapısı P2D1-C1 yapısının, P2D2-C2 yapısı da P2D1-C2 yapısının aynısıdır.

Tablo 6.10 Durum Çalışması-2 sonucunda bulunan toplam işletme maliyeti seviyelerini, bu bölgeler içinde bulunan yapıları ve bu yapıların esneklik indekslerini (δ^*) vermektedir.

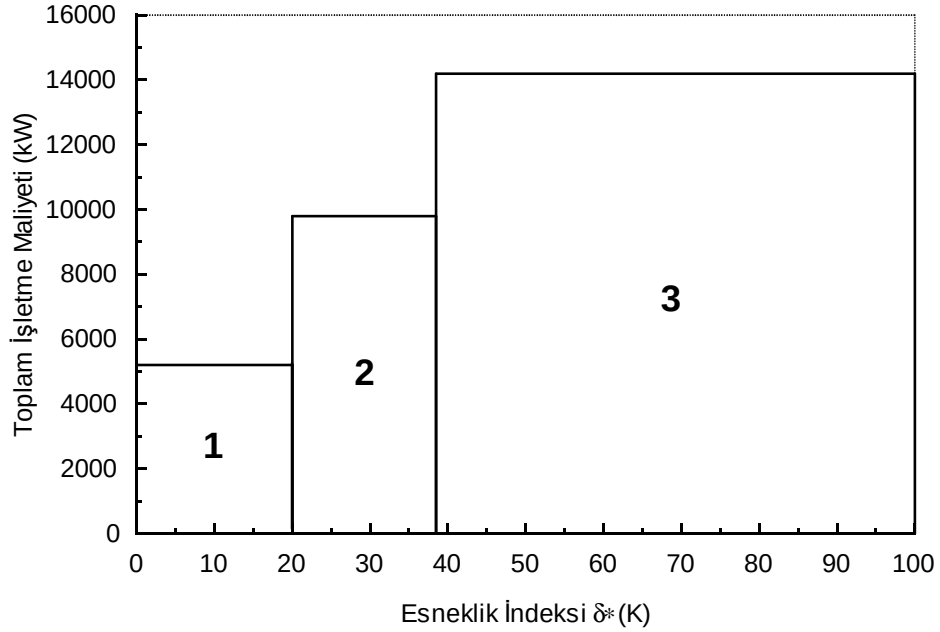
Tablo 6.10 Durum Çalışması-2 Sonucunda Bulunan Yapılar ve Esneklik İndeksleri

B	Yapılar	(δ^*)	B	Yapılar	(δ^*)
1	P2D2-A	18.82 K	2	P2D2-B5	44.13 K
2	P2D2-B1	20 K		P2D2-B6	57.5 K
	P2D2-B2	20 K		P2D2-B7	80 K
	P2D2-B3	34.11 K	3	P2D2-C1	100 K
	P2D2-B4	38.46 K		P2D2-C2	100 K

6.2.3 Durum Çalışması-3

Bu durum çalışmasında, problem üç kademeli süper yapı için MILP formülasyonu ile incelenmiştir. Muhtemel yapıların en çok ısı değiştirici sayısı 5 ile sınırlandırılmıştır (Denklem 5.28). İstenilen esneklik indeksi 0 K'den 100 K'e kadar değiştirilmiş ve toplam işletme maliyetinin değişimi gözlenmiştir.

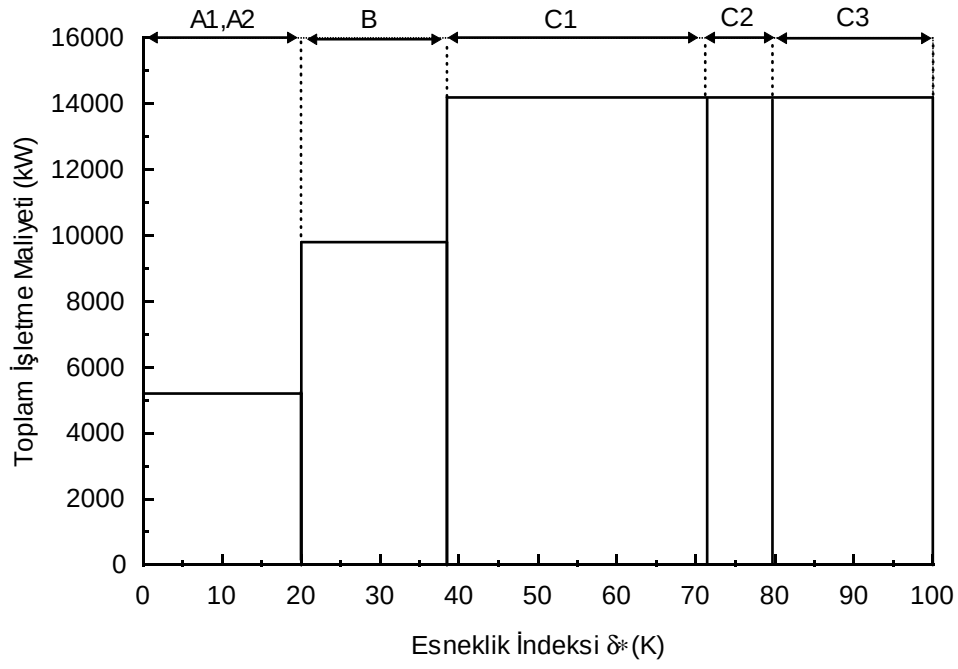
Şekil 6.68 toplam işletme maliyetinin istenilen esneklik indeksine göre değişimini vermektedir.



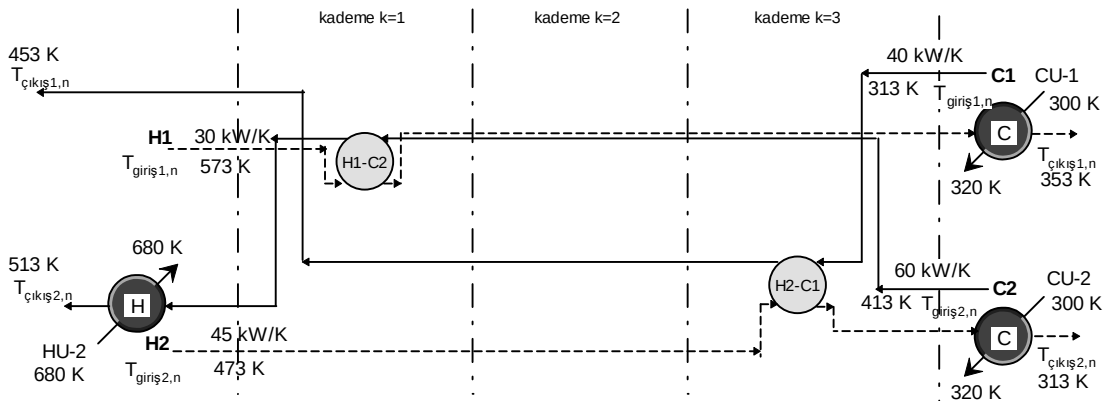
Şekil 6.68 Toplam İşletme Maliyetinin Esneklik İndeksine Göre Değişimi

Şekil 6.69 Durum Çalışması-3 için istenilen esneklik miktarının değişimiyle toplam işletme maliyetinin değişimini ve oluşan bölgeler içinde bulunan yapıları da vermektedir. Birinci bölge içinde iki yapı, ikinci bölge içinde bir yapı ve üçüncü bölge içinde iki yapı bulunmuştur.

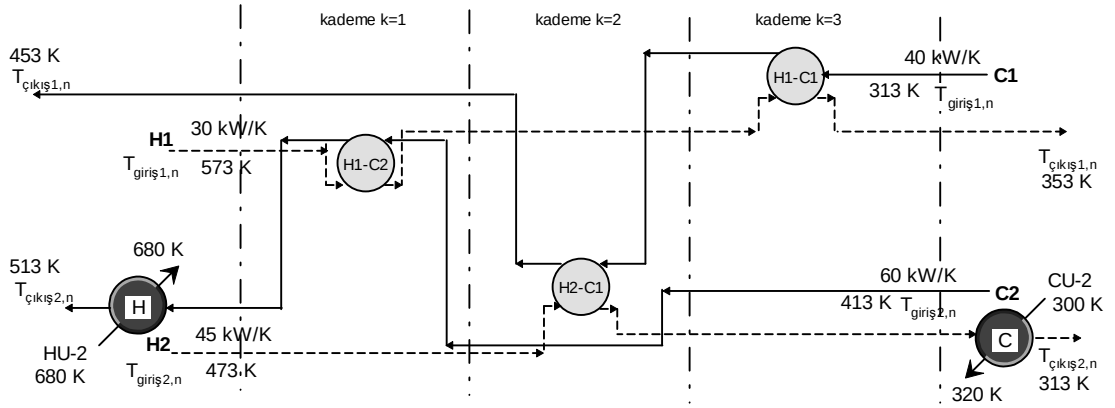
Birinci bölge içinde P2D3-A1 ve P2D3-A2 yapıları bulunmuştur. Her iki yapının da ısıtma maliyeti 1500 kW, soğutma maliyeti 3700 kW ve toplam işletme maliyeti 5200 kW'tır. Şekil 6.70 P2D3-A1, Şekil 6.71 P2D3-A2 yapısını göstermektedir.



Şekil 6.69 Nominal Çalışma Koşullarında A1'den C3'e Toplam İşletme Maliyetlerinin Esneklik İndeksine (δ^*) Göre Değişimi

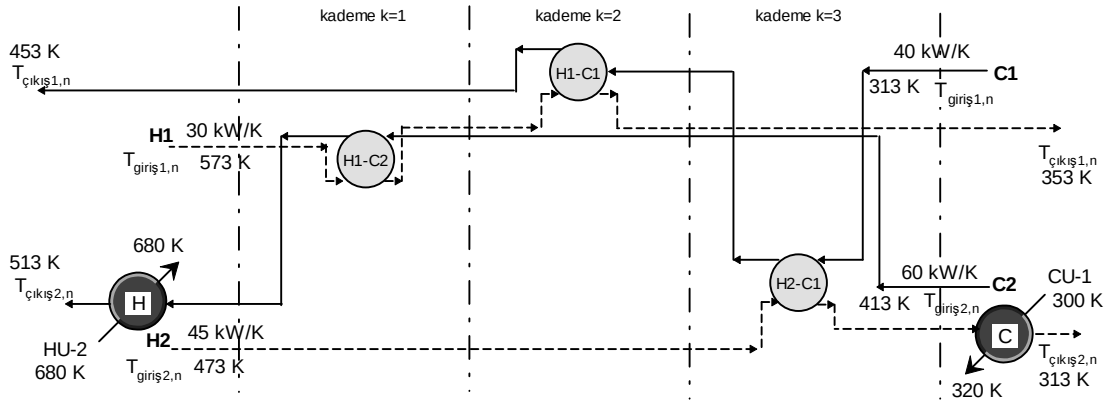


Şekil 6.70 P2D3-A1 Yapısı



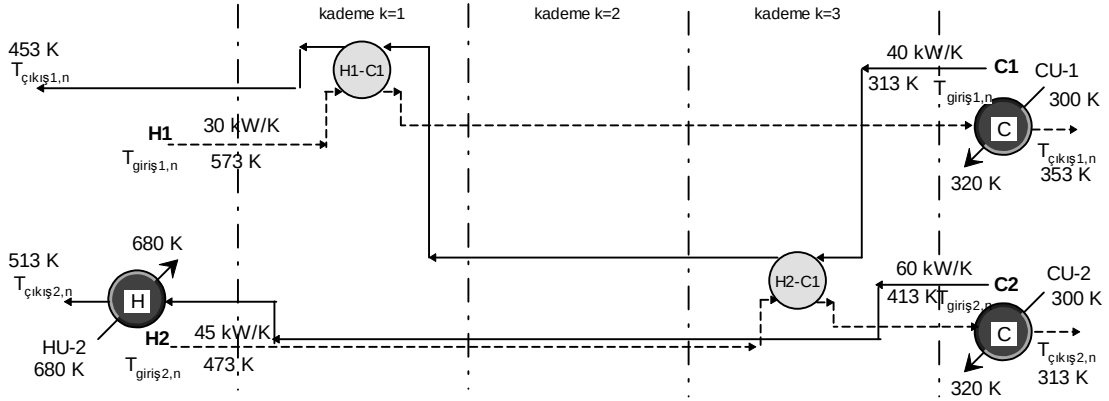
Şekil 6.71 P2D3-A2 Yapısı

İkinci bölge içinde P2D3-B yapısı bulunmuştur. P2D3-B yapısının ısıtma maliyeti 3800 kW, soğutma maliyeti 6000 kW ve toplam işletme maliyeti 9800 kW'tır. Şekil 6.72 P2D3-B yapısını göstermektedir.

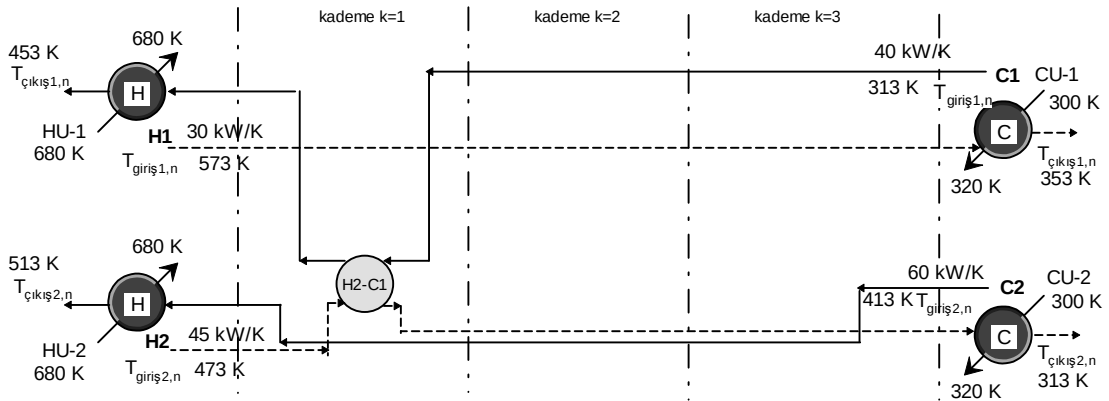


Şekil 6.72 P2D3-B Yapısı

Üçüncü bölge içinde birbirinden farklı üç yapı bulunmuştur (P2D3-C1, P2D3-C2, P2D3-C3) (Şekil 6.73, Şekil 6.74). P2D3-C3 yapısı P2D1-C1 yapısının aynısıdır. Her üç yapının da ısıtma maliyeti 6000 kW, soğutma maliyeti 8200 kW ve toplam işletme maliyetleri 14200 kW'tır.



Şekil 6.73 P2D3-C1 Yapısı



Şekil 6.74 P2D3-C2 Yapısı

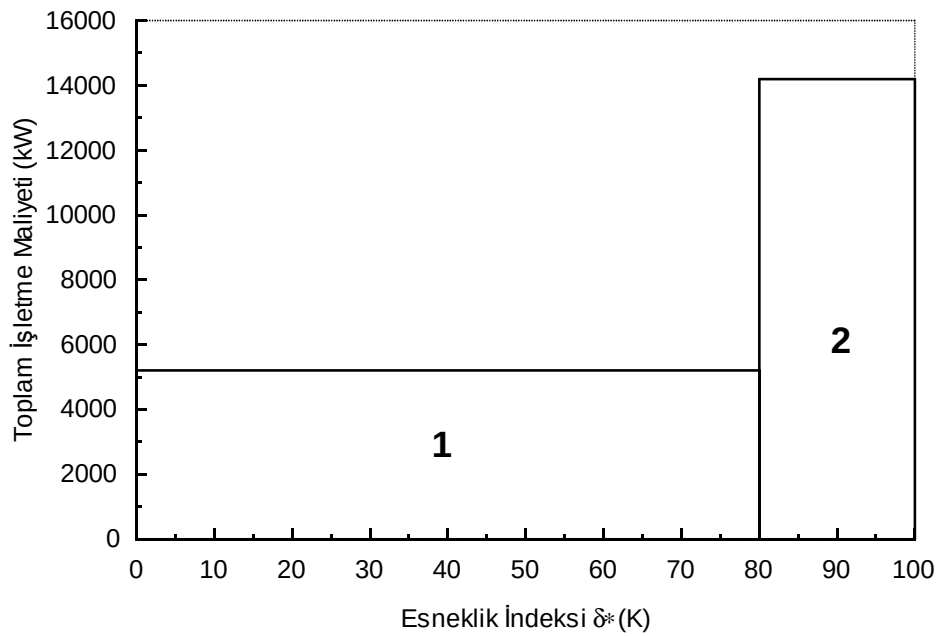
Tablo 6.11 Durum Çalışması-3 sonucunda bulunan toplam işletme maliyeti seviyelerini, bu bölgeler içinde bulunan yapıları ve bu yapıların esneklik indekslerini (δ^*) vermektedir.

Tablo 6.11 Durum Çalışması-3 Sonucunda Bulunan Yapılar ve Esneklik İndeksleri

B	Yapılar	(δ^*)	B	Yapılar	(δ^*)
1	P2D3-A1	20 K	3	P2D3-C1	71.3 K
	P2D3-A2	20 K		P2D3-C2	80 K
2	P2D3-B	38.46 K		P2D3-C3	100 K

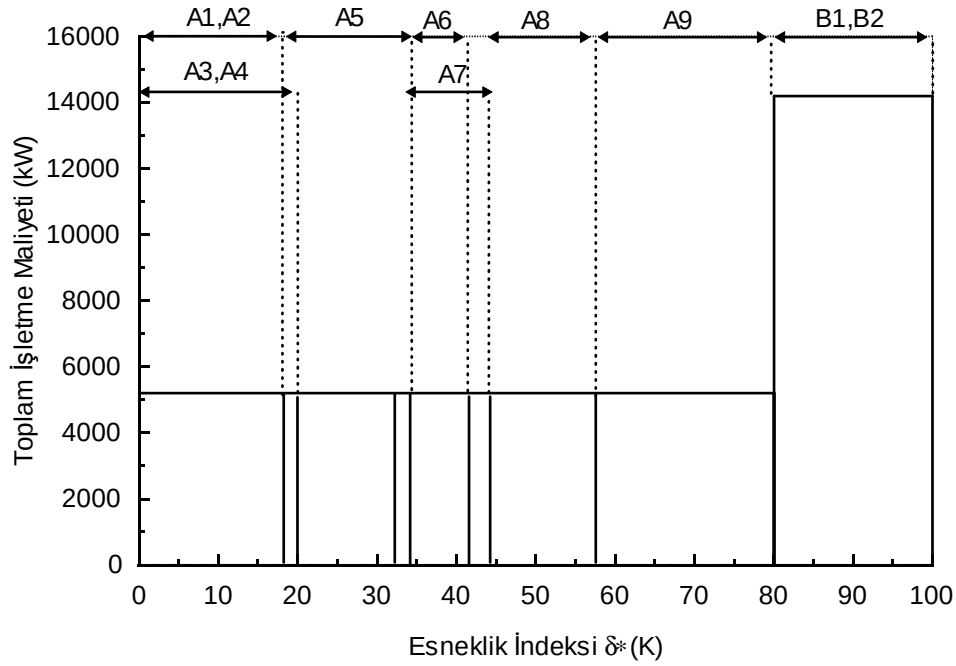
6.2.4 Durum Çalışması-4

Bu durum çalışmasında problem için süper yapı kademe sayısı ikiye çıkarılmış ve muhtemel yapıların en çok ısı değiştirici sayısı 6 ile sınırlandırılarak esneklik kriterini içine alan MILP formülasyonu ile incelenmiştir. İstenilen esneklik indeksi miktarı 0 K'den 100 K'e kadar artırılarak toplam işletme maliyeti seviyelerinin değişimi incelenmiştir. Şekil 6.75 bu değişimi göstermektedir.



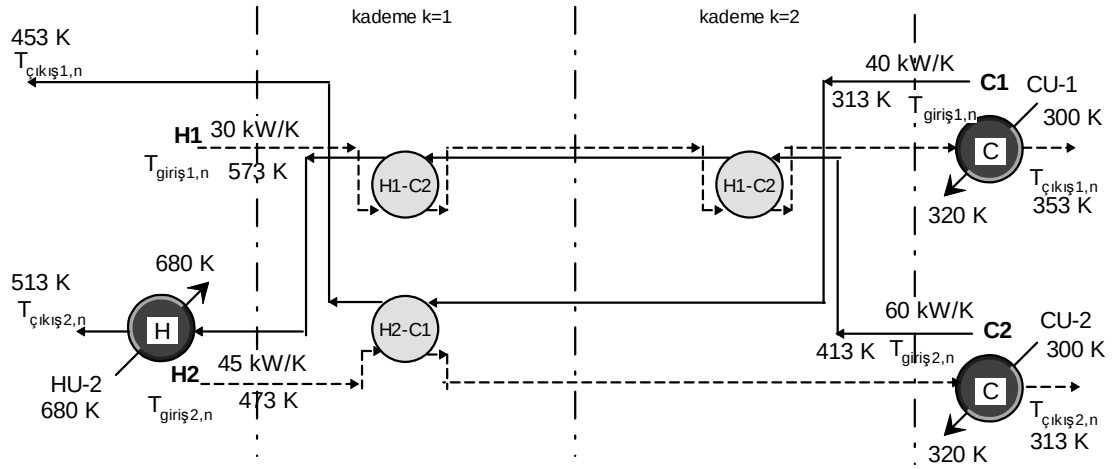
Şekil 6.75 Toplam İşletme Maliyetinin Esneklik İndeksine Göre Değişimi

Şekil 6.76 Durum Çalışması-4 için istenilen esneklik miktarının değişimiyle toplam işletme maliyetinin değişimini ve oluşan bölgeler içinde bulunan yapıları da vermektedir. 5200 kW ve 14200 kW'lık iki farklı bölge bulunmuştur. Birinci bölge içinde dokuz yapı ve ikinci bölge içinde iki yapı bulunmuştur.

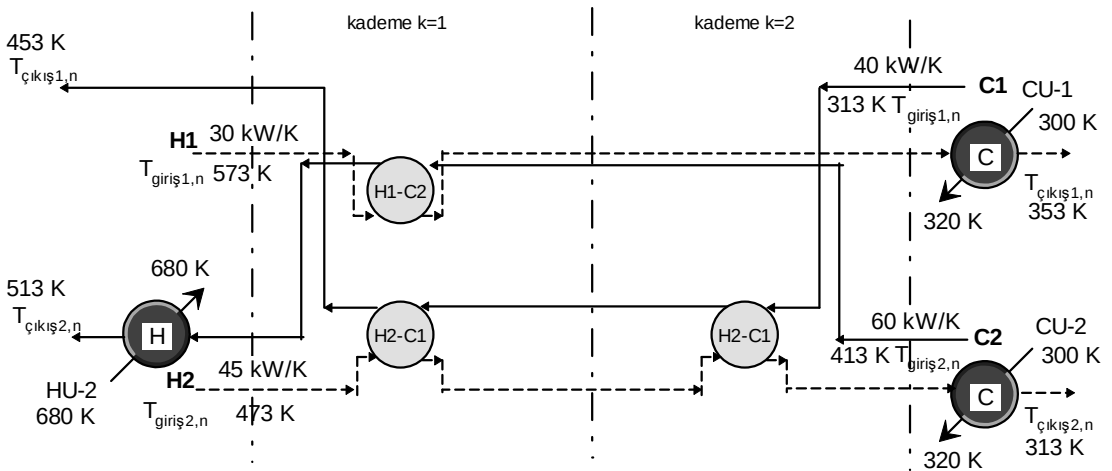


Şekil 6.76 Nominal Çalışma Koşullarında A1'den B2'ye Toplam İşletme Maliyetlerinin Esneklik İndeksine (δ^*) Göre Değişimi

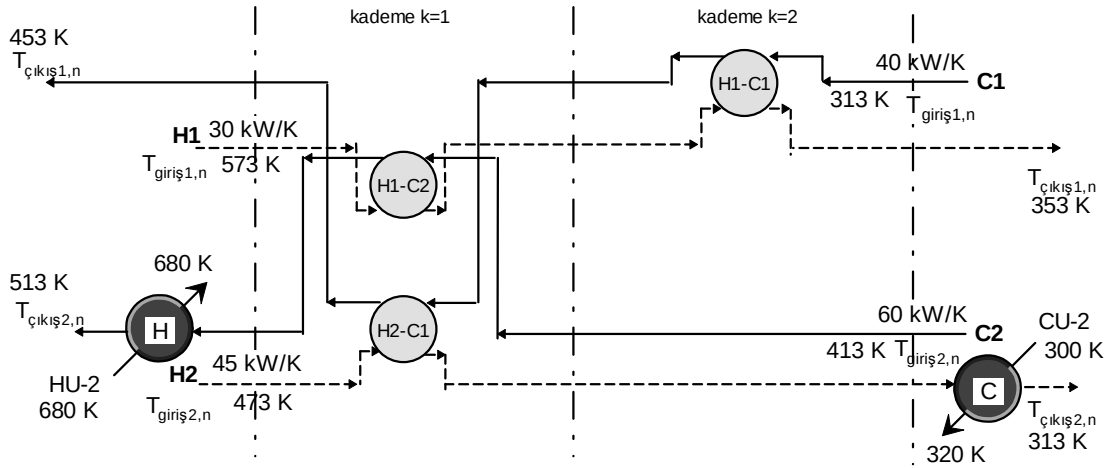
Birinci bölge içinde P2D4-A1 yapısı (Şekil 6.77), P2D4-A2 yapısı (Şekil 6.78), P2D4-A3 yapısı (Şekil 6.79) ve P2D4-A4 yapısı bulunmuştur. P2D4-A4 yapısı P2D2-B2 yapısının, P2D4-A5 yapısı P2D2-B3 yapısının aynısıdır. P2D4-A6 yapısı Şekil 6.80'de verilmiştir. P2D4-A7 yapısı P2D2-B5 yapısının, P2D4-A8 yapısı P2D2-B6 yapısının ve P2D4-A9 yapısı da P2D2-B7 yapısının aynısıdır. Yapıların ısıtma maliyeti 1500 kW, soğutma maliyeti 3700 kW ve toplam işletme maliyeti 5200 kW'tır.



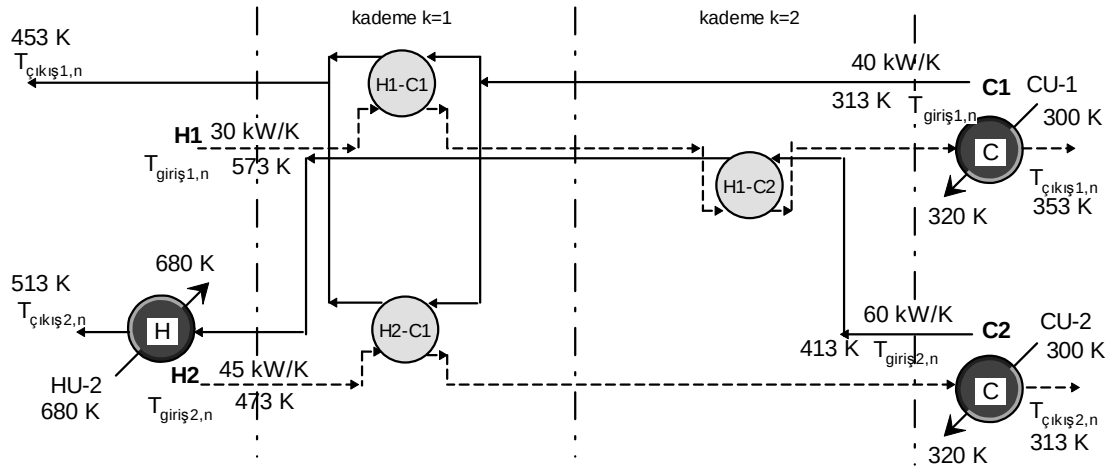
Şekil 6.77 P2D4-A1 Yapısı



Şekil 6.78 P2D4-A2 Yapısı



Şekil 6.79 P2D4-A3 Yapısı



Şekil 6.80 P2D4-A6 Yapısı

İkinci bölge içinde bulunan P2D4-B1 yapısı Durum Çalışması-1’de bulunan P2D1-C1 yapısının ve P2D4-B2 yapısı P2D1-C2 yapısının aynısıdır.

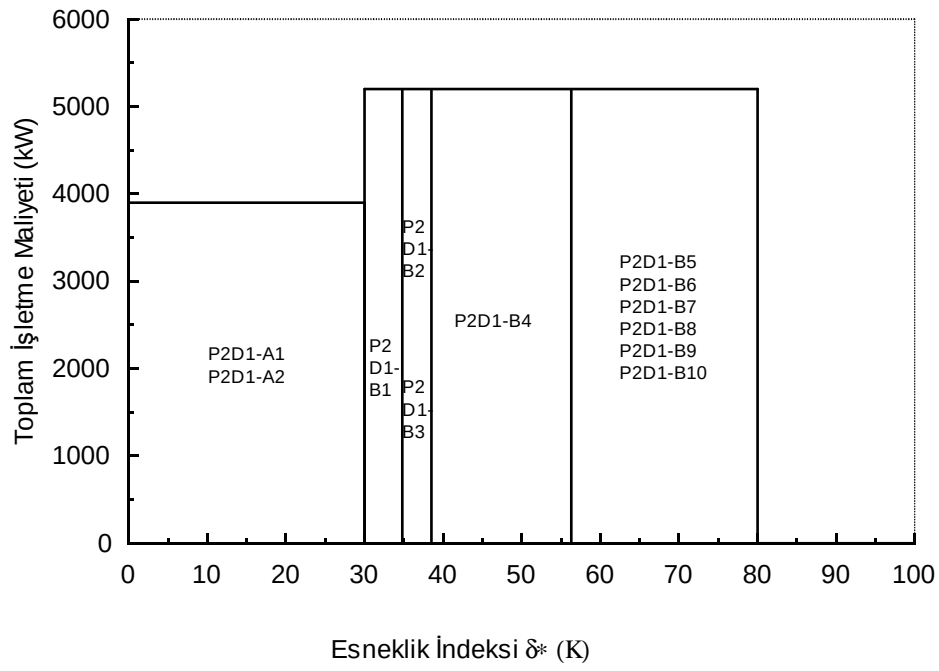
Tablo 6.12 Durum Çalışması-4 sonucunda bulunan toplam işletme maliyeti seviyelerini, bu bölgeler içinde bulunan yapıları ve bu yapıların esneklik indekslerini (δ^*) vermektedir.

Tablo 6.12 Durum Çalışması-4 Sonucunda Bulunan Yapılar ve Esneklik İndeksleri

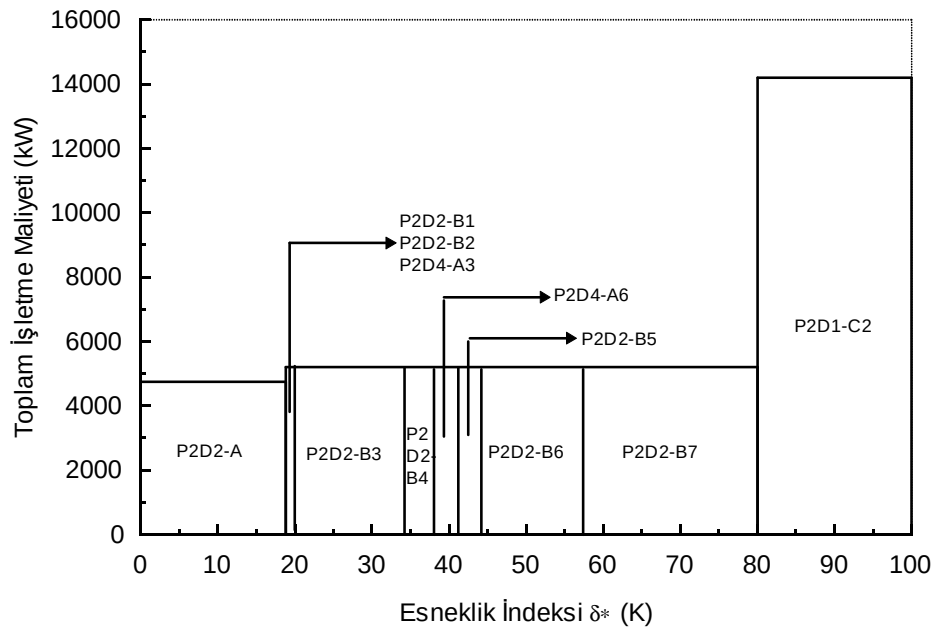
B	Yapılar	(δ^*)	B	Yapılar	(δ^*)
1	P2D4-A1	18.82 K	1	P2D4-A7	41.13 K
	P2D4-A2	18.82 K		P2D4-A8	57.5 K
	P2D4-A3	20 K		P2D4-A9	80 K
	P2D4-A4	20 K	2	P2D4-B1	100 K
	P2D4-A5	34.11		P2D4-B2	100 K
	P2D4-A6				

6.2.5 Durum Çalışmalarının Isı Değiştirici Sayısına Göre Değerlendirilmesi

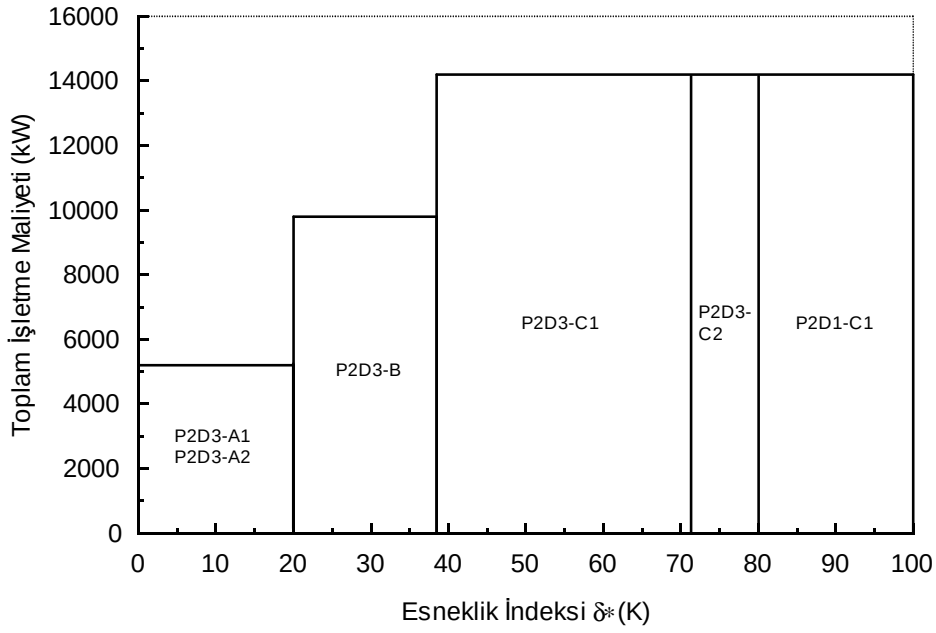
Bu bölümde, Problem-2 için yapılan durum çalışmalarında istenilen esneklik indeksi için elde edilen toplam işletme maliyeti seviyeleri ve bu seviyeler içinde bulunan ısı değiştirici ağ grupları, ihtiva ettikleri ısı değiştirici sayıları bakımından incelenmiştir. Yedi ısı değiştiricili ağ grupları, istenilen esneklik indeksi için işletme maliyeti seviyeleri ile birlikte Şekil 6.81’de, altı ısı değiştiricili ağ grupları, istenilen esneklik indeksi için işletme maliyeti seviyeleri ile birlikte Şekil 6.82’de, beş ısı değiştiricili ağ grupları, istenilen esneklik indeksi için işletme maliyeti seviyeleri ile birlikte Şekil 6.83’de verilmiştir.



Şekil 6.81 Problem-2 İçin Yedi Isı Değiştiricili Yapılar



Şekil 6.82 Problem-2 İçin Altı Isı Değiştiricili Yapılar



Şekil 6.83 Problem-2 İçin Beş Isı Değiştiricili Yapılar

Bu bölümde verilen şekiller, aynı istenilen esneklik indeksi için değişik ısı değiştirici sayılarından oluşan ağlar arasındaki ütilite tüketim seviyeleri arasındaki farkları vermektedir. Şekiller incelendiğinde bu problemde de aynı esneklik değeri için ağ sentezinde bulunan yapıların ısı değiştirici sayıları düştükçe ütilite tüketim seviyelerinin arttığı bulunmuştur.

6.2.6 Problem-2'in Durum Çalışmalarının Değerlendirilmesi

Tablo 6.13 Problem-2 için yapılan durum çalışmaları sonucunda istenilen esneklik indeksi değişimi ile toplam işletme maliyeti seviyelerinin nasıl değiştiğini vermektedir. Durum Çalışması-1'de üç kademeli süperyapı için en çok ısı değiştirici sayısı 7 olarak sınırlandırılarak Problem-2 çözüldüğünde üç farklı bölge bulunmuştur. Birinci bölge içinde pinch çözümü sonucunda bulunan yapı ve ısıtma, soğutma ihtiyaçları bulunmuştur.

Tablo 6.13 Değişik Durum Çalışmalarında Toplam İşletme Maliyeti
Seviyelerinin (kW) İstenilen Esneklik İndeksine Göre Değişimi
(Problem-2)

	0-18.82	18.82-20	20-30	30-38.46	38.46-80	80-100
3 Kademeli 7 ID'li Çözüm	3900			5200		14200
3 Kademeli 6 ID'li Çözüm	4750	5200				14200
3 Kademeli 5 ID'li Çözüm	5200		9800		14200	
2 Kademeli 6 ID'li Çözüm	5200					14200

Durum Çalışması-2’de kademe sayısı sabit tutulup ısı değiştirici sayısı 6’ya düşürülmüştür. Çözüm sonucunda Durum Çalışması-1’den farklı olarak aynı esneklik seviyelerinde daha yüksek işletme maliyetli bölgeler ve bu bölgeler içinde daha yüksek maliyetli yapılar bulunmuştur. Birinci bölge içinde pinch çözümüne ulaşamamıştır. Kotjabasakis and Linnhoff’un (1986) matematiksel problem çözümü yapmadan henüz yapısal tasarım aşamasında iken daha esnek ısı değiştirici ağlarına ulaşmak için önerdikleri ‘Aşağı Akım Patikaları’ yöntemini uygulamaları sonucunda pinch çözümünden daha esnek olduğunu düşündükleri yapı daha az esneklikte ve daha yüksek maliyetle birinci bölge içinde gözlenmiştir.

Durum Çalışması-3’de üç kademeli süperyapı için ısı değiştirici sayısı 5’e düşürülmüştür. Farklı işletme maliyetlerinde üç bölge bulunmuştur. Durum Çalışması-1 ve Durum Çalışması-2’de aynı istenilen esneklik indeksi aralıkları için bulunan bölgelerden daha yüksek maliyetli bölgeler bulunmuştur.

Durum Çalışması-4’de iki kademeli süperyapı için en çok ısı değiştirici sayısı 6 ile sınırlandırıldığında iki farklı bölge bulunmuştur. Durum Çalışması-1’de bulunan pinch çözümü beklenildiği gibi bulunamamıştır. Durum Çalışması-2 ve Durum Çalışması-3’de aynı istenilen esneklik indeksi aralıkları için bulunan bölgelerden daha yüksek maliyetli bölgeler bulunmuştur.

Durum Çalışmaları sonuçları incelendiğinde kademe sayısının düşürülmesi ile aynı esneklik miktarları için daha yüksek maliyetli bölgeler gözlenmiştir. Isı değiştirici sayısının azaltılmasıyla aynı esneklik miktarlarında daha yüksek maliyetli bölgeler ve bu bölgeler içinde daha yüksek maliyetli yapı grupları bulunmuştur.

7. ÇOK PERİYOTLU ESNEK ISI DEĞİŞTİRİCİ AĞLARININ SÜPERYAPI TABANLI MILP FORMÜLASYONU İLE SENTEZİ

Enaz maliyetle ençok enerji geri kazanımı, ısı değıştirci ağı sentezinde üzerinde uzun yıllardır çalışılan konulardan birisidir. Fakat belirsiz pazar koşulları yüzünden ısı değıştirci ağlarının değışen işletme koşulları ile de başa çıkabilmesi gerekmektedir (Papalexandri, 1993). Pazar koşullarındaki dalgalanmalar üretim çeşitlerinin, üretim miktarlarının ve çalışma koşullarının dönem dönem değışmesine neden olmaktadır. Bu yüzden bir ısı değıştirci ağı değışik periyotlarda, farklı besleme akım sıcaklıklarına ve akım debilerine sahip sistemler için kullanılabilmelidir. Yapılan ısı değıştirci ağı tasarımı her bir periyot için işletme koşullarında oluşabilecek kısa süreli değışimleri (akımların besleme akım sıcaklıkları ve debileri) tolere edebilecek esneklikte olmalıdır.

7.1 Problemin Tanımı

Bu bölümde önceki bölümlerde verilen formülasyonun (Denklem 5.2a-5.28) çok periyotlu koşullar için de uygulanabileceği gösterilmiş ve iki periyotlu, her periyot için belli sıcaklıklara soğutulacak iki sıcak akım ve belli sıcaklıklara ısıtılacak iki soğuk akım bulunan bir sistem araştırılmıştır. İki periyotlu ve her bir periyot için de istenilen esneklik miktarında enaz işletme maliyetli ısı değıştirci ağ yapıları araştırılmıştır. Birinci periyot için ısı değıştirci ağı problem verileri Tablo 7.1’de, ikinci periyot için ısı değıştirci ağı problem verileri Tablo 7.2’de verilmiştir. Birinci ve ikinci periyot için verilen ısı değıştirci ağ problemleri birbirlerinden bağımsız çözülmüş (tek bir ısı değıştirci problemi gibi düşünülerek) ve istenilen esneklik miktarı değışimi ile ısı değıştirci ağ yapılarının ve toplam işletme maliyetinin değışimi gözlenmiştir. Daha sonra iki periyotlu ısı değıştirci ağı için iki problem birleştirilmiş, istenilen esneklik miktarları eşitlenerek basamak basamak arttırılmıştır. İstenilen esneklik miktarları her periyot için aynı alınarak adım adım

artırılmıştır. İstenilen esneklik miktarı değişimi ile çok periyotlu ısı değiştirici ağı yapısal grupların ve işletme maliyeti seviyelerinin değişimi gözlenmiştir.

Tablo 7.1: Birinci periyot için ısı değiştirici ağı problem verileri

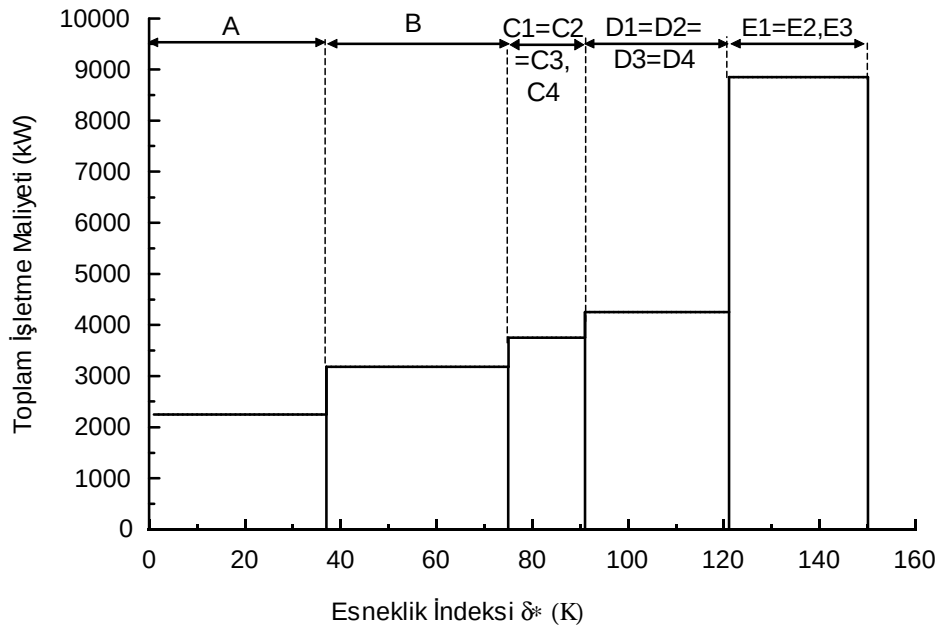
AKIMLAR	HCF (kW/K)	Tgiriş (K)	Tçıkış (K)
Sıcak Akım 1 (H1)	10	650	370
Sıcak Akım 2 (H2)	20	590	370
Soğuk Akım 1 (C1)	15	410	650
Soğuk Akım 2 (C2)	13	350	500
BUHAR	-	680	680
SOĞUTMA SUYU	-	300	320

Tablo 7.2: İkinci periyot için ısı değiştirici ağı problem verileri

AKIMLAR	HCF (kW/K)	Tgiriş (K)	Tçıkış (K)
Sıcak Akım 1 (H1)	10	580	360
Sıcak Akım 2 (H2)	15	480	320
Soğuk Akım 1 (C1)	13	320	460
Soğuk Akım 2 (C2)	20	420	520
BUHAR	-	680	680
SOĞUTMA SUYU	-	300	320

7.1.1 Durum Çalışması-1

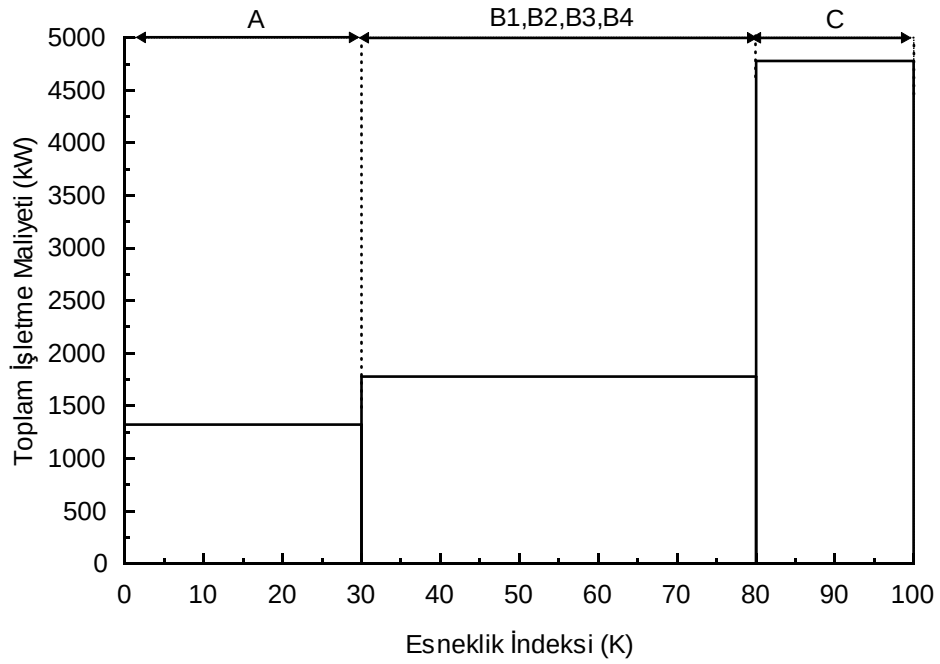
Birinci ve ikinci periyot için ısı değiştirici ağı problemlerinin birbirlerinden bağımsız oldukları düşünülerek her iki periyot için, istenilen esneklik miktarlarında en düşük ütilite maliyetli ısı değiştirici ağ yapılarının bulunabilmesi için süperyapı üzerinden yazılan MILP formülasyonu kullanılmıştır. Birinci periyotta verilen ısı değiştirici ağı problemi Altıncı Bölüm Problem-1’de verilen problemin aynısıdır. Problem-1 için istenilen esneklik indeksine göre toplam işletme maliyetinin ve yapısal ısı değiştirici ağı gruplarının değişimi Şekil 7.1’de verilmektedir.



Şekil 7.1 Nominal Çalışma Şartlarında A'dan E3'e Toplam İşletme Maliyetlerinin Esneklik İndeksine (δ^*) Göre Değişimi.

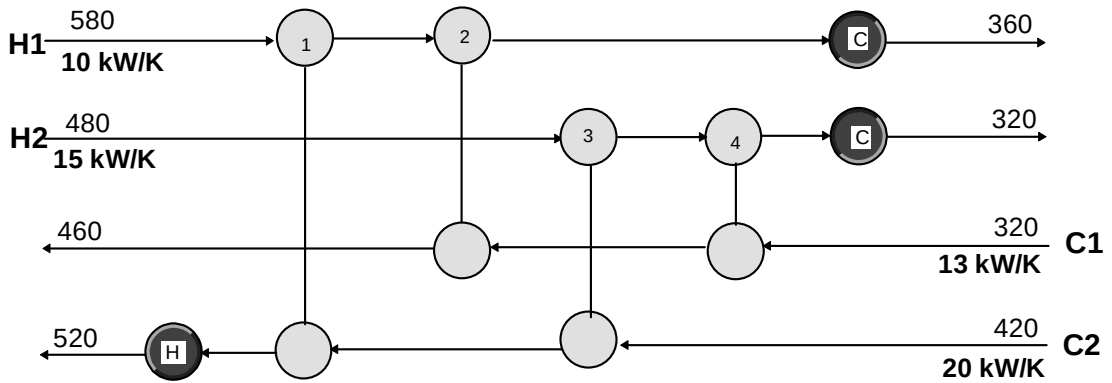
İkinci periyotta verilen ısı değiştirici ağı probleminin üç kademeli süperyapı için en çok ısı değiştirici sayısı yedi ile sınırlandırılarak MILP formülasyonu ile çözümü yapılmıştır. Bir basamaklı, iteratif olmayan, aynı zamanlı MILP formülasyonu istenilen esneklik seviyelerinde iki sıcak akım, iki soğuk akım için toplam 16 bozucu etki yönünde nominal çalışma koşullarında en düşük toplam işletme maliyeti ile çalışabilecek yapıların bulunması amacıyla kullanılmıştır. İkinci soğuk akım için giriş sıcaklığı 420 K ve çıkış sıcaklığı 520 K olduğu için istenilen esneklik indeksi değerleri 100 K'e kadar artırılmış ve Şekil 7.2 oluşturulmuştur.

Birinci bölge 0 K'den 30 K'e kadar istenilen esneklik indeksini ve 1320 kW'lık toplam işletme maliyetini göstermektedir. Bölge içinde bir yapı (A) bulunmuştur. Yapı dört ısı değiştirici, bir ısıtıcı ve iki soğutucudan oluşmaktadır. (Şekil 7.3). Bu yapının toplam işletme maliyetleri 1320 kW, ısıtma maliyeti 270 kW ve soğutma maliyeti 1050 kW'dır. Yapı besleme akım sıcaklıklarında 30 K'e kadar her yönde olabilecek değişimlerde çalışabilmektedir. Bu yapı aynı zamanda problemin pinch çözümü sonucunda bulunan yapıdır.



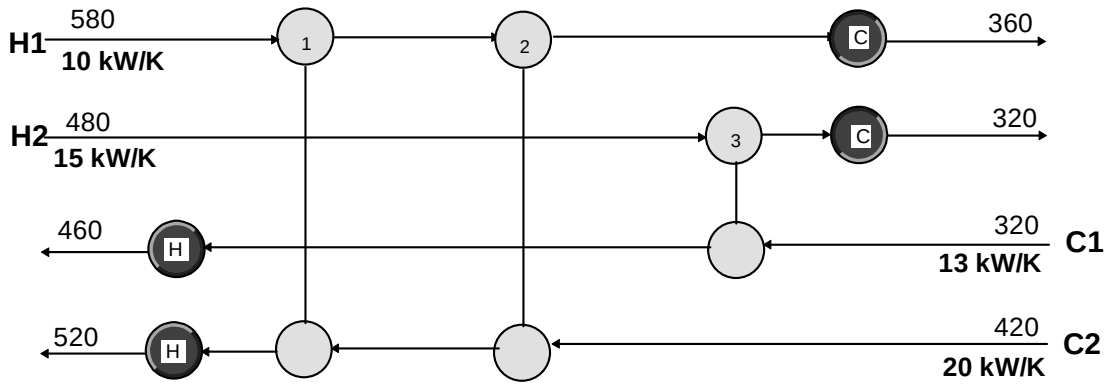
Şekil 7.2 Nominal Çalışma Şartlarında A'dan C'ye Toplam İşletme Maliyetlerinin Esneklik İndeksine (δ^*) Göre Değişimi

Şekil 7.2 A'dan C'ye toplam işletme maliyetinin istenilen esneklik indeksine göre değişimini göstermektedir. Şekil 7.2 incelendiğinde 1320 kW, 1780 kW ve 4780 kW olmak üzere üç farklı bölgenin bulunduğu görülmektedir.

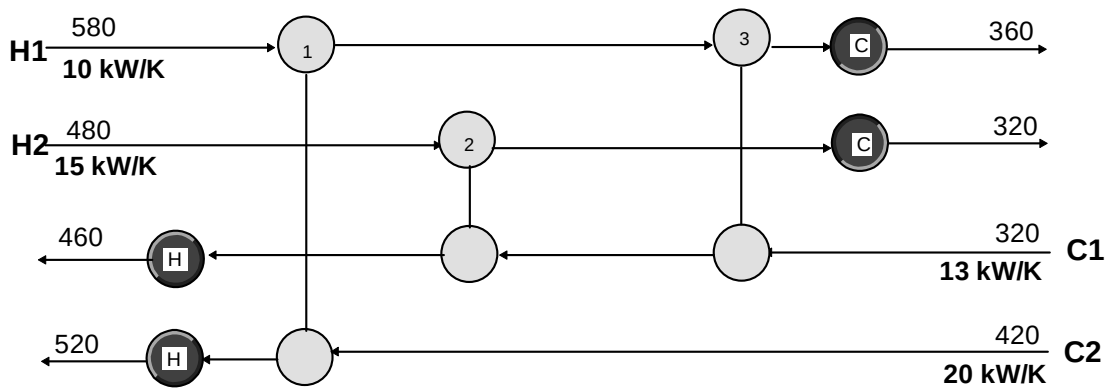


Şekil 7.3 A Yapısı

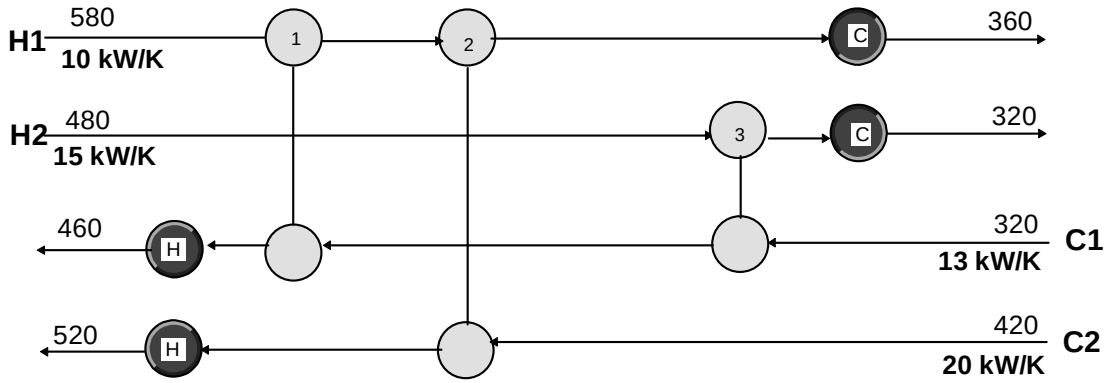
İkinci bölge 30 K'den 80 K'e kadar istenilen esneklik indeksini ve 1780 kW'lık toplam işletme maliyetini göstermektedir. Bölge içinde birbirinden farklı dört yapı bulunmuştur. B1, B2 ve B3 yapıları üç ısı değiştirici, iki ısıtıcı ve iki soğutucudan oluşmaktadır (Şekil 7.4, Şekil 7.5, Şekil 7.6). B4 yapısı ise iki ısı değiştirici, iki ısıtıcı ve iki soğutucudan oluşmaktadır (Şekil 7.7). Bu yapıların toplam işletme maliyetleri 1780 kW, ısıtma maliyeti 500 kW ve soğutma maliyeti 1280 kW'dır. Yapılar besleme akım sıcaklıklarında 80 K'e kadar her yönde olabilecek değişimlerde çalışabilmektedir.



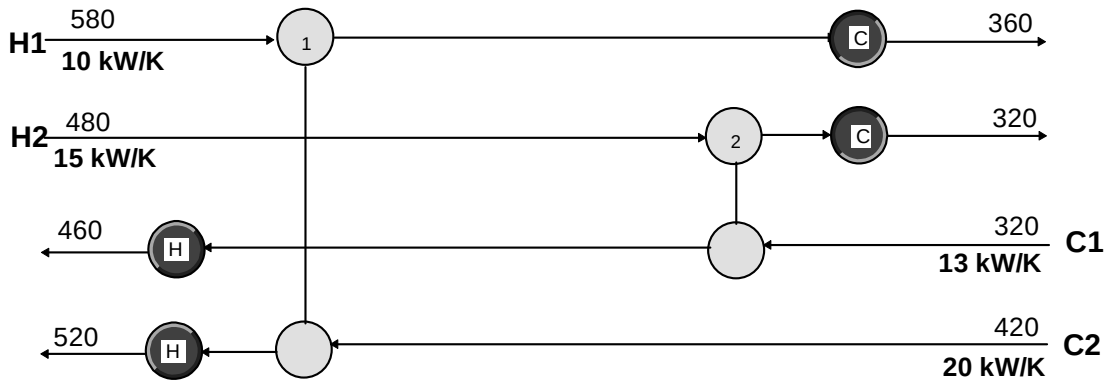
Şekil 7.4 B1 Yapısı



Şekil 7.5 B2 Yapısı

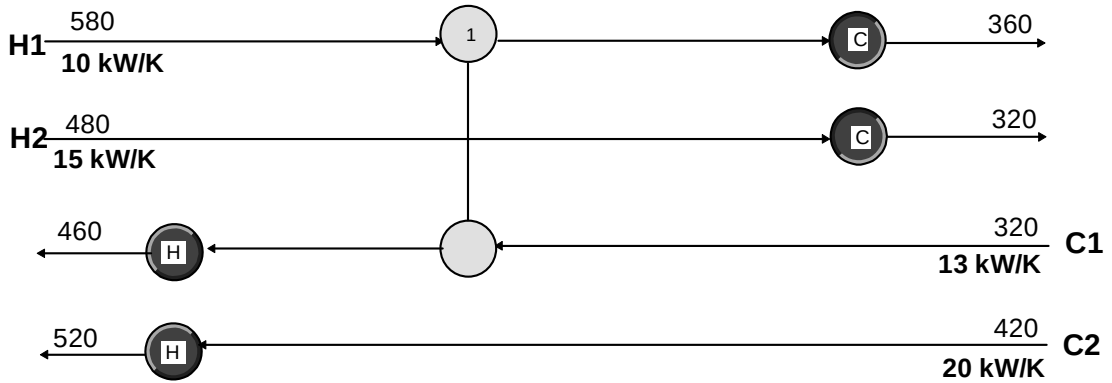


Şekil 7.6 B3 Yapısı



Şekil 7.7 B4 Yapısı

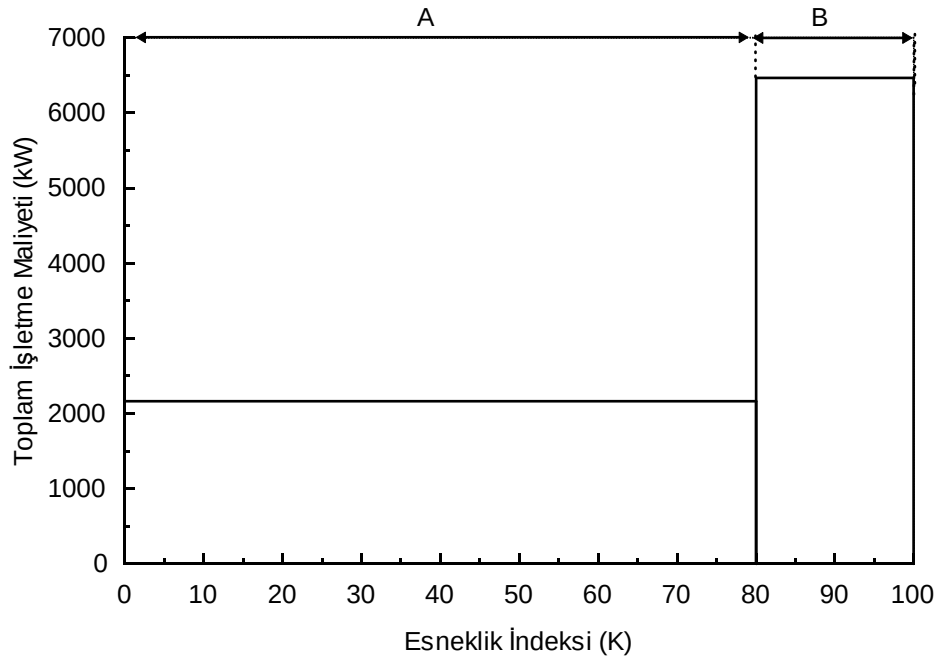
Üçüncü bölge 80 K'den 100 K'e kadar istenilen esneklik indeksini ve 4780 kW'lık toplam işletme maliyetini göstermektedir. Bölge içinde bir yapı (C) bulunmuştur. C yapısı bir ısı değiştirici, iki ısıtıcı ve iki soğutucudan oluşmaktadır (Şekil 7.8). Bu yapının toplam işletme maliyetleri 4780kW, ısıtma maliyeti 2000 kW ve soğutma maliyeti 2780 kW'dır. Yapılar besleme akım sıcaklıklarında 100 K'e kadar her yönde olabilecek değişimlerde çalışabilmektedir.



Şekil 7.8 C Yapısı

7.2 Durum Çalışması-2

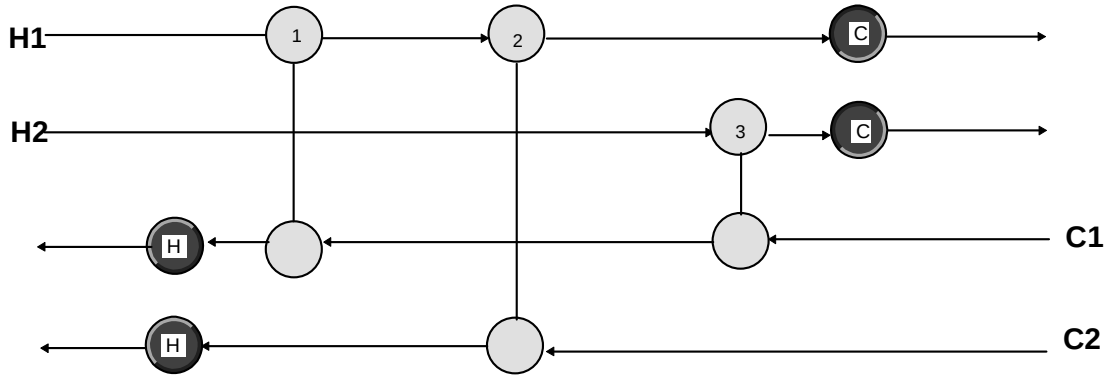
Tek periyotlu ısı değiştirici ağı sentez probleminin çözümü için geliştirilen iki ve üç kademeli süperyapı için kullanılan MILP formülasyonu Tablo.1 ve Tablo.2’de akım verileri verilen her iki ısı değiştirici problemini aynı anda çözebilecek ve her bir periyot için tasarımcı tarafından istenilen esneklik kriterini sağlayacak şekilde geliştirilip genelleştirilmiştir. Amaç fonksiyonunu, her iki periyodun nominal çalışma koşullarındaki ısıtma ve soğutma maliyetlerinden oluşan işletme maliyetinin ağırlıklı toplamının enazlanması oluşturmaktadır. Ortaya çıkan yapıların olurluluğunu sağlayan indirgenmiş eşitsizlik kısıtlarını ise termodinamik kısıtlar ve tasarımcı tarafından istenilen esneklik kriterleri oluşturmaktadır. Birinci periyot çalışma koşullarının 6 ay/yıl, ikinci periyot çalışma koşullarının 6 ay/yıl olduğu kabul edilmiştir. Her iki periyot için de istenilen esneklik miktarları aynı değer olarak alınmış ve toplam işletme maliyetinin değişimi gözlenmiştir.



Şekil 7.9 Ağırlıklı Toplam İşletme Maliyetinin İstenilen Esneklik Miktarına Göre Değişimi

Şekil 7.9 A'dan B'e ağırlıklı toplam işletme maliyetinin istenilen esneklik miktarına göre değişimini göstermektedir. Şekil incelendiğinde 2165 kW ve 6465 kW'lık iki farklı bölge olduğu görülmektedir.

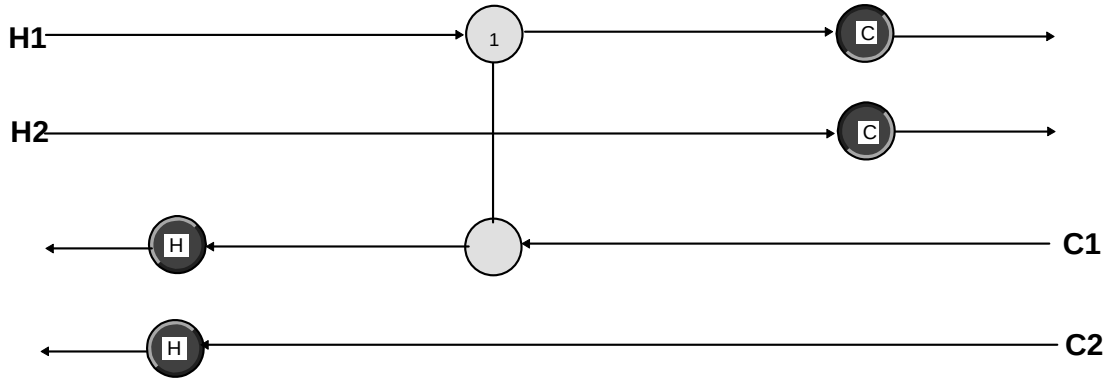
Birinci bölge 2165 kW'lık ağırlıklı toplam işletme maliyetini ve 0 K'den 80 K'e her iki periyot ısı değiştirici ağı akım koşulları için istenilen esneklik miktarlarını göstermektedir. Bu bölge içinde her iki periyot için besleme akım sıcaklıklarında aynı anda, aynı miktarda 80 K'e kadar her yönde olabilecek değişimlerde toplam 2165 kW'lık ağırlıklı işletme maliyetinde çalışabilecek tek bir yapı görülmektedir (A). A yapısı üç ısı değiştirici iki ısıtıcı ve iki soğutucudan oluşmaktadır (Şekil 7.10). H1-C1 ısı değiştiricisi birinci kademed, H2-C1 ısı değiştiricisi ikinci kademed ve H1-C2 ısı değiştiricisi üçüncü kademed bulunmaktadır. Sıcak akımları çıkışlarında soğutucular ve soğuk akımları çıkışlarında ısıtıcılar bulunmaktadır.



Şekil 7.10 A Yapısı

A yapısının ağırlıklı toplam işletme maliyeti 2165 kW, ağırlıklı toplam ısıtma maliyeti 475 kW ve ağırlıklı toplam soğutma maliyeti 1690 kW'tır. Birinci periyot için toplam işletme maliyeti 1275 kW, ısıtma maliyeti 225 kW ve soğutma maliyeti 1050 kW'tır. İkinci periyot için toplam işletme maliyeti 890 kW, ısıtma maliyeti 250 kW ve soğutma maliyeti 640 kW'tır.

İkinci bölge 6465 kW'lık ağırlıklı toplam işletme maliyetini ve 80 K'den 100 K'e her iki periyot ısı değiştirici ağı akım koşulları için istenilen esneklik miktarlarını göstermektedir. Bu bölge içinde her iki periyot için besleme akım sıcaklıklarında 100 K'e kadar her yönde olabilecek değişimlerde toplam 6465 kW'lık ağırlıklı işletme maliyetinde çalışabilecek bir yapı bulunmuştur (B). B yapısı bir ısı değiştirici iki ısıtıcı ve iki soğutucudan oluşmaktadır (Bütün sıcak akımları çıkışlarında soğutucu ve bütün soğuk akımları çıkışlarında ısıtıcı bulunmaktadır). (Şekil 7.11).

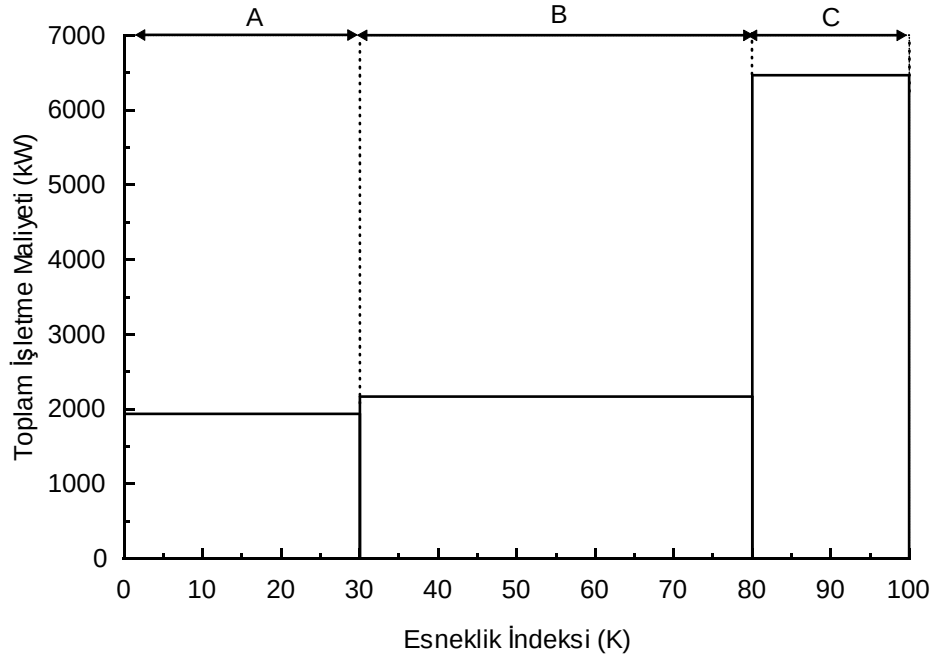


Şekil 7.11 B Yapısı

B yapısının ağırlıklı toplam işletme maliyeti 6465 kW, ağırlıklı toplam ısıtma maliyeti 2625 kW ve ağırlıklı toplam soğutma maliyeti 3840 kW'tır. Birinci periyot için toplam işletme maliyeti 4075 kW, ısıtma maliyeti 1625 kW ve soğutma maliyeti 2450 kW'tır. İkinci periyot için toplam işletme maliyeti 2390 kW, ısıtma maliyeti 1000 kW ve soğutma maliyeti 1390 kW'tır.

Birinci periyot için verilen ısı değiştirici ağı probleminin pinch çözümü sonucunda toplam işletme maliyeti 2550 kW, ısıtma maliyeti 450 kW ve soğutma maliyeti 2100 kW bulunmuştu. İkinci periyot için verilen ısı değiştirici ağının pinch çözümü sonucunda ise toplam işletme maliyeti 1320 kW, ısıtma maliyeti 270 kW ve soğutma maliyeti 1050 kW bulunmuştu. Bu çok periyotlu problem için süperyapı kademe sayısı üç ile, ençok ısı değiştirici sayısı yedi ile sınırlandırıldığında ve her periyodun maliyet üzerindeki etkisi eşit alındığında, sıfır esneklik değerindeki yapının toplam ütilite tüketiminin $((2550+1320)/2) = 1935$ olması beklenmelidir (eğer her iki periyot için birden enaz ütilite tüketimini sağlayan bir yapı gerçekten varsa). Fakat ençok yedi ısı değiştiricili ve üç kademeli süperyapı tabanlı iki periyotlu çözüm sonucunda bulunan ağırlıklı toplam işletme maliyeti ise 2165 kW olarak bulunmuştur. 1935 kW ağırlıklı toplam işletme maliyetine ulaşabilmek için ençok ısı değiştirici sayısı basamak basamak artırılmıştır. Ençok ısı değiştirici sayısı dokuza çıkarıldığında üç kademeli süperyapı tabanlı iki periyotlu ısı değiştirici ağı probleminin ağırlıklı toplam işletme maliyeti 1935 kW olarak bulunmuştur. Şekil 7.12 ençok ısı değiştirici sayısının dokuza çıkarıldığı durumda her iki periyot için istenilen esneklik indeksine göre ağırlıklı toplam işletme maliyetinin değişimini

göstermektedir. Şekil incelendiğinde 1935 kW, 2165 kW ve 6465 kW'lık üç farklı bölge görülmektedir.



Şekil 7.12 Ençok Dokuz Isı Değiştiricili Çok Periyotlu Ağların Ağırlıklı Toplam İşletme Maliyetinin İstenilen Esneklik Miktarına Göre Değişimi

Birinci bölge içinde bulunan A yapılarının ağırlıklı toplam işletme maliyetleri 1935 kW, ısıtma maliyetleri 360 kW ve soğutma maliyetleri 1575 kW bulunmuştur. Birinci periyot için ağırlıklı toplam işletme maliyeti 1275 kW, ısıtma maliyeti 225 kW ve soğutma maliyeti 1050 kW'tır. İkinci periyot için ağırlıklı toplam işletme maliyeti 660 kW, ısıtma maliyeti 135 kW ve soğutma maliyeti 525 kW'tır.

İkinci bölge içinde bulunan B yapılarının ağırlıklı toplam işletme maliyetleri 2165 kW, ısıtma maliyetleri 475 kW ve soğutma maliyetleri 1690 kW bulunmuştur. Birinci periyot için ağırlıklı toplam işletme maliyeti 1275 kW, ısıtma maliyeti 225 kW ve soğutma maliyeti 1050 kW'tır. İkinci periyot için ağırlıklı toplam işletme maliyeti 890 kW, ısıtma maliyeti 250 kW ve soğutma maliyeti 640 kW'tır.

Üçüncü bölge içinde bulunan C yapısının ağırlıklı toplam işletme maliyetleri 6465 kW, ısıtma maliyetleri 2625 kW ve soğutma maliyetleri 3840 kW bulunmuştur. Birinci periyot için ağırlıklı toplam işletme maliyeti 4075 kW, ısıtma maliyeti 1625 kW ve soğutma maliyeti 2450 kW'tır. İkinci periyot için ağırlıklı toplam işletme maliyeti 2390 kW, ısıtma maliyeti 1000 kW ve soğutma maliyeti 1390 kW'tır.

7.1.3 İki Periyotlu IDA Sentez Probleminin Sonuçları

Bu bölümde iki periyotlu, her periyot için belli sıcaklıklara soğutulacak iki sıcak akım ve belli sıcaklıklara ısıtılacak iki soğuk akım bulunan bir sistem incelenmiştir. İki periyotlu ve her bir periyot için de istenilen esneklik miktarında enaz işletme maliyetli ısı değiştirici ağ yapıları bulunmaya çalışılmıştır. İki periyotlu ısı değiştirici ağ probleminin periyot süreleri birinci periyot ve ikinci periyot için eşit tutulmuştur. Süperyapı tabanlı MILP formülasyonu ile yapılan çözüm sonucunda (ençok ısı değiştirici sayısı yedi ile sınırlandırıldığında) iki farklı bölge ve bu bölgeler içinde birer yapı bulunmuştur. Bu yapılar her iki periyodun birbirinden bağımsız çözümü sonucunda ikili değişkenler birbirine eşitlendiği için her iki periyotta bulunması gereken yapılardır. Birinci bölge içinde bulunan yapıların toplam işletme maliyetlerinin yarısı birinci periyot ısı değiştirici ağ probleminden, diğer yarısı ise ikinci periyot ısı değiştirici ağ probleminden gelmektedir. Ağırlıklı toplam işletme, ısıtma ve soğutma maliyetleri her iki periyotta ençok yedi ısı değiştirici için incelendiğinde birinci periyodun pinch çözümündeki ütilite tüketimini verdiği verdiği, fakat ikinci periyodun daha yüksek maliyetle çalıştığı bulunmuştur. İkinci periyodun pinch çözümüne ulaşabilmek amacıyla üç kademeli süperyapı için ençok ısı değiştirici sayısı arttırılmıştır. Ençok ısı değiştirici sayısı ancak dokuz çıkarıldığında birinci ve ikinci periyot için pinch çözümleri sağlanabilmiştir. Her iki periyot ısı değiştirici ağ sentez problemlerinin birbirlerinden bağımsız çözümleri yapıldığında ençok yedi ısı değiştirici tahdidiyle pinch çözümünün verdiği enaz ütilite tüketimi seviyesine ulaşılırken, iki periyotlu problemin çözümünde her iki periyot içinde pinch çözümünün verdiği enaz ütilite tüketim seviyeleri ancak ençok dokuz ısı değiştirici tahdidiyle bulunabilmiştir.

8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışma ısı değiştirici ağlarının esnek sentezini gerçekleştiren süperyapı tabanlı, tek basamaklı, iteratif olmayan bir karışık tamsayı doğrusal programlama formülasyonu üzerinedir. Formülasyonda kullanılan esneklik kriteri, besleme akımlarının tümünün sıcaklıklarında her yönde (artma veya azalma) aynı anda aynı miktarda olabilecek esneklik değeridir. Formülasyonda, ısı değiştirici ağlarının ısıtma ve soğutma ihtiyaçlarını karşılayan ısıtıcı ve soğutucuların işletme maliyetlerinin istenilen esneklik değeri için enazlanması amaçlanmaktadır. İstenilen esneklik miktarının değişimi ile toplam işletme maliyeti bölgelerinin değişimi örnek problemler üzerinde incelenmiştir. İncelenen örnek problemlerde, istenilen esneklik değeri için ütilite tüketimi aynı olan farklı yapılar bulunabileceği yani problemin çözümün tekil olmadığı tespit edilmiştir. Ayrıca, bölgeler içinde bulunan aynı işletme maliyetli yapıların dayanabilecekleri maksimum esneklik miktarları (esneklik indeksi değerleri) hesaplanmıştır. Esneklik indeksi, literatürde, besleme akımlarının tümünün sıcaklıklarında (veya debilerinde) her yönde (artma veya azalma) aynı anda aynı miktarda olabilecek en büyük değer olarak tanımlanmakta ve besleme akımı sıcaklıkları sözkonusu olduğunda belirsizlik uzayında bir hiperdikdörtgen tanımlamaktadır. Böylece formülasyonun istenilen esneklik değeri için verdiği yapıların esnekliğinin gerçekte konveks bir uzayda esneklik indeksi değerine kadar uzanacağı görülmüştür.

Örnek problemlerde, ısı değiştirici ağlarının istenilen esneklik değerinde minimum işletme maliyetli sentezleri için istenilen esneklik miktarı seviyeleri artırılarak toplam işletme maliyetinin değişimi izlenmiştir. Farklı işletme maliyetli bölgeler ve bu bölgeler içinde, süperyapıda farklı ikili değişkenlerce oluşturulan ısı değiştirici ağ yapıları bulunmuştur. Farklı ikili değişken takımlarınca oluşturulan bu yapılar içinde bazılarının aynı, bazılarının ise farklı yapılar olduğu tespit edilmiştir. Aynı ütilite tüketim bölgesi içinde bulunan yapıların besleme akım sıcaklıklarında her yönde meydana gelebilecek değişimleri en çok ne kadar tolere edebilecekleri (esneklik indeksleri) hesaplandığında birbirinden farklı esnekliklerde çalışan yapılar bulunmuştur.

Süperyapı tabanlı ısı değiştirici ağ sentezi formülasyonu için, literatürde, en fazla sıcak veya soğuk akım sayısı olarak verilen süperyapı kademe sayısının, bir artırılması ile daha düşük işletme maliyetli ara bölgeler ve bu bölgeler içinde daha düşük maliyetle, aynı esneklikte çalışabilen farklı ısı değiştirici ağ yapıları bulunmuştur. Bu yapılara daha düşük kademe sayılı süper yapı çözümü ile ulaşamayacağı görülmüştür. Süperyapı kademe sayısının düşürülmesiyle de daha yüksek maliyetli ve daha az sayıda muhtemel ısı değiştirici ağ yapılarına rastlanmıştır. Akım sayısı + Ütilite sayısı + Döngü sayısı – Problem sayısı olarak verilen en çok ısı değiştirici sayısının artırılmasıyla da daha düşük maliyetli ve daha fazla sayıda muhtemel ısı değiştirici ağ yapılarına rastlanmıştır. Problemin pinch çözümü sonucunda bulunan ısı değiştirici sayısının daha altında yapılan çözümlerde ise istenilen esneklik indeksi için daha yüksek maliyetli bölgeler ve bu bölgeler içinde daha yüksek maliyetli yapılar görülmüştür.

Esnek ısı değiştirici ağı sentezinde kullanılan karışık tamsayı doğrusal programlama formülasyonu, çift periyotlu ısı değiştirici ağı problemlerinin çözümü için geliştirilmiştir. Çift periyotlu ısı değiştirici ağı sentezi problemi için, her periyodunda belli sıcaklıklara soğutulacak iki sıcak akım ve belli sıcaklıklara ısıtılacak iki soğuk akım bulunan bir örnek problem incelenmiştir. Birinci ve ikinci periyot için verilen ısı değiştirici ağ problemleri önce birbirlerinden bağımsız çözülmüş ve istenilen esneklik miktarı değişimi ile ısı değiştirici ağ yapılarının ve toplam işletme maliyeti seviyelerinin değişimi incelenmiştir. Daha sonra iki periyotlu ısı değiştirici ağı için iki problem birleştirilmiş, istenilen esneklik miktarları her iki periyot için de aynı alınarak adım adım artırılmıştır. İkili değişkenler eşitlenerek (bir ısı değiştiricinin her iki periyotta da varolması ve olmaması tahdidi altında) her iki periyot için de kullanılabilecek yapılara ulaşılmıştır. İstenilen esneklik miktarının değişimi ile çok periyotlu ısı değiştirici ağı yapısal gruplarının ve ağırlıklı toplam işletme maliyeti seviyelerinin değişimi izlenmiştir.

Çift periyotlu ısı değiştirici ağ probleminin periyot süreleri birinci periyot ve ikinci periyot için eşit tutulmuştur. Yapılan çözüm sonucunda iki farklı bölge ve bu bölgeler içinde birer yapı bulunmuştur. Birinci bölge içinde bulunan yapıların toplam

işletme maliyetlerinin yarısı birinci periyot ısı değiştirici ağ probleminden, diğer yarısı ise ikinci periyot ısı değiştirici ağ probleminden gelmiştir. Ağırlıklı toplam işletme maliyetleri her iki periyotta ençok yedi ısı değiştirici tahdidi altında incelendiğinde birinci periyodun pinch çözümündeki ütilite tüketimini verdiği, fakat ikinci periyodun daha yüksek maliyetle çalıştığı bulunmuştur. İkinci periyodun pinch çözümündeki ütilite tüketimine ulaşabilmek amacıyla üç kademeli süperyapı için ençok ısı değiştirici sayısı artırılmıştır. Ençok ısı değiştirici sayısı ancak dokuz çıkarıldığında birinci ve ikinci periyot için pinch çözümlerindeki ütilite tüketim miktarları sağlanmıştır. Her iki periyot ısı değiştirici ağ sentez problemlerinin birbirlerinden bağımsız çözümleri yapıldığında ençok yedi ısı değiştirici için pinch çözümlerindeki ütilite tüketimi sağlanırken, iki periyotlu problemin için ençok dokuz ısı değiştirici tahdidinin gerekli olduğu bulunmuştur.

Süperyapıya dayalı esnek ısı değiştirici ağı sentezi formülasyonu probleme doğrusal olmayan özellik katan alan hesaplamaları da göz önünde bulundurularak, tek ve çok periyotlu ısı değiştirici ağ problemleri için istenilen esneklik değerinde enaz ağırlıklı toplam maliyeti verecek şekilde geliştirilebilir. Formülasyon içinden ısıtma ve soğutma maliyetleri çıkarılarak sistem sadece ağırlıklı yatırım maliyetlerini hedefleyecek hale de dönüştürülebilir. Yine formülasyona doğrusal olmayan özellik katacak olan, esneklik değerini besleme akımları temelinde değerlendiren yaklaşımlar da geliştirilebilir.

KAYNAKLAR

Bahri P.A., J.A. Bandoni, J.A. Romagnoli (1997). ‘Integrated Flexibility and Controllability Analysis in Design of Chemical Processes’, *AIChE Journal*, **43(4)**, 997-1015.

Biegler L.T., I.E. Grossmann, A.W. Westerberg (1997). *Systematic Methods of Chemical Process Design*, Prentice Hall PTR, New Jersey, USA.

Colberg R.D., M. Morari (1988). ‘Analysis and Synthesis of Resilient Heat Exchanger Networks’, *Advances in Chemical Engineering*, (Editors: J. Wei, J.L. Anderson, K.B. Bischoff, J.H. Seinfeld), **14**, 11-93, Academic Press, USA.

Dougless J.M. (1988). *Conceptual Design of Chemical Processes*, McGraw-Hill, New York.

Grossmann I.E., C.A. Floudas (1987). ‘Active Constraint Strategy for Flexibility Analysis in Chemical Processes’, *Computers and Chemical Engineering*, **11(6)**, 675-693.

Gundersen T., L. Naess (1988). ‘Review Paper – The Synthesis of Cost Optimal Heat Exchangers Networks’, *Computers and Chemical Engineering*, **12(6)**, 503-530.

Halemane K.P., I.E. Grossmann (1983). ‘Optimal Process Design Under Uncertainty’, *AIChE Journal*, **29(3)**, 425-433.

Konukman A.E.Ş., U. Akman, M.C. Çamurdan (1995). ‘Optimal Design of Controllable Heat-Exchangers Networks Under Multi-Directional Resiliency-Target Constraints’, *Computers and Chemical Engineering*, **19S**, 149-151.

Konukman A.E.Ş. (1996). *Optimal Resilient Retrofit Design of Heat-Exchanger Networks*, Doktora Tezi, Boğaziçi Üniversitesi, Türkiye.

Konukman A.E.Ş., U. Akman, M.C. Çamurdan (1999). 'Synthesis of Energy-Optimal HEN Structures with Specified Flexibility Index through Simultaneous MILP Formulation', *Proceedings of PRES'99: 2nd Conference on Process Integration, Modelling and Optimisation for Energy Saving and Pollution Reduction*, (Editors: F.Friedler, J. Klemes, Zs. Ercsey), Hungarian Chemical Society, Budapest, HUNGARY, 395-400.

Kotjabasakis E., B. Linnhoff (1986). 'Downstream Paths for Operable Process Design', *Chem. Eng. Prog.* **82(5)**, 23.

Linnhoff B., D.R. Mason, I. Wardle (1979). 'Understanding Heat Exchanger Networks', *Computers and Chemical Engineering*, **3**, 295.

Linnhoff B., E.Hindmarsh (1983). 'The Pinch Design Method for Heat Exchanger Networks', *Chemical Engineering Science*, **38**, 745.

Masso A.H., D.F. Rudd (1969). 'The Synthesis of System Designs', *AIChE Journal*, **15**, 11-17.

Nishida N., Y.A. Liu, L. Lapidus (1977). 'Studies in Chemical Process Design and Synthesis', *AIChE Journal*, **23(1)**, 77-92.

Papalexandri K.P., E.N. Pistikopoulos (1992). 'A Multiperiod MINLP Model for Improving the Flexibility of Heat Exchanger Networks', *Computers and Chemical Engineering*, **16S**, 111-116.

Papalexandri K.P., E.N. Pistikopoulos (1993). 'An MINLP Retrofit Approach for Improving the Flexibility of Heat Exchanger Networks', *Annals of Operations Research*, **42**, 119-168.

Papoulias S.A., I.E. Grossmann (1983). 'A Structural Optimization Approach in Process Synthesis – II. Optimal Level of Flexibility', *Computers and Chemical Engineering*, **7(6)**, 707-721.

Pistikopoulos E.N., I.E. Grossmann (1989). 'Optimal Retrofit Design for Improving Process Flexibility in Nonlinear Systems- I. Fixed Degree of Flexibility', *Computers and Chemical Engineering*, **13(9)**, 1003-1016.

Pistikopoulos E.N., I.E. Grossmann (1989). 'Optimal Retrofit Design for Improving Process Flexibility in Nonlinear Systems- II. Optimal Level of Flexibility', *Computers and Chemical Engineering*, **13(10)**, 1087-1096.

Quesada I., I.E. Grossmann (1993). 'Global Optimisation Algorithm for Heat Exchanger Networks', *Industrial and Engineering Chemistry Research*, **32**, 487-497.

Saboo A.K., M. Morari (1984). 'Design of Resilient Processing Plants-IV. Some New Results on Heat Exchanger Network Synthesis', *Chemical Engineering Science*, **39(3)**, 579-592.

Swaney R.E., I.E. Grossmann (1985). 'An Index for Operational Flexibility in Chemical Process Design', *AIChE Journal*, **31(4)**, 622-641.

Yee T.F., I.E. Grossmann (1990-a). 'Simultaneous Optimisation Models for Heat Integration – I : Area and Energy Targeting and Modelling of Multi-Stream Exchangers', *Computers and Chemical Engineering*, **14**, 1151-1164.

Yee T.F., I.E. Grossmann (1990-b). 'Simultaneous Optimisation Models for Heat Integration – II : Heat Exchanger Network Synthesis', *Computers and Chemical Engineering*, **14**, 1165-1183.

Yee T.F., I.E. Grossman (1991). 'Simultaneous Optimisation Models for Heat Exchanger Network Synthesis', in *Chemical Engineering Optimisation Models with GAMS*, (Editor: Grossmann I.E., CACHE Design Case Studies Series, Case Study NO:6).

Zamora J.M., Grossmann I.E. (1996). 'A Global MINLP Optimisation Algorithm for the Synthesis of Heat Exchanger Networks with No Stream Splits', *Computers and Chemical Engineering*, **22(3)**, 367-684.

ÖZGEÇMİŞ

1973 yılında Adapazarı'nda doğdu. İlk ve ortaokulu Sakarya'nın Karasu ilçesinde bitirdi. Lise eğitimini 1991 yılında İstanbul'da Kuleli Askeri Lisesi'nde bir yıl İngilizce hazırlık eğitimini müteakip tamamladı. Aynı yıl Kara Harp Okulunda lisans eğitimine başladı. Ağustos 1995'de sistem mühendisi topçu teğmen olarak mezun oldu. Haziran 1996'da Topçu ve Füze Okulu'nda subay temel kursunu bitirdi. Değişik askeri birliklerde takım komutanı olarak görev aldı. Şubat 1998'de Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü'nde Enerji Sistemleri Bölümü'nde Yüksek Lisans öğrenimine başladı. Ağustos 1998'de üsteğmen oldu. Halen Şırnak ilinin Uludere ilçesinde takım komutanı olarak görev yapmaktadır.

EKLER

EK-1

**TEK BİR BOZUCU ETKİ YÖNÜ İÇİN ISI DEĞİŞTİRİCİ
AĞININ ESNEKLİĞİNİN BULUNMASI**

* Bu model ısı değiştirici ağının esneklik miktarını sadece bir bozucu
 * etki yönü için hesaplar

VARIABLES

S, T1S, T2S, T3S, T4S, T1, T2, T3, T4, T5, T6;

EQUATIONS

EQ1, EQ2 , EQ3 ,EQ4 ,EQ5 ,EQ6 ,EQ7 ,EQ8 ,
 EQ9 ,EQ10 ,EQ11 ,EQ12 ,EQ13 ,EQ14 ,EQ15 ,
 EQ16 ,EQ17 ,EQ18 ,EQ19 ,EQ20 ,EQ21, EQ22, EQ23;

EQ1 .. $10 \cdot (T1S - T1) + 13 \cdot (T3 - T5) = E = 0$;
 EQ2 .. $15 \cdot (T2S - T2) + 13 \cdot (T3S - T3) = E = 0$;
 EQ3 .. $10 \cdot (T1 - T6) + 20 \cdot (T4S - T4) = E = 0$;

EQ4 .. $T1 - T1S = L = 0$;
 EQ5 .. $T2 - T2S = L = 0$;
 EQ6 .. $T6 - T1 = L = 0$;
 EQ7 .. $T3 - T5 = L = 0$;
 EQ8 .. $T3S - T3 = L = 0$;
 EQ9 .. $T4S - T4 = L = 0$;

EQ10 .. $T6 = G = 360$;
 EQ11 .. $T5 = L = 460$;
 EQ12 .. $T2 = G = 320$;
 EQ13 .. $T4 = L = 520$;

EQ14 .. $T5 - T1S = L = 0$;
 EQ15 .. $T4 - T1 = L = 0$;
 EQ16 .. $T3 - T1 = L = 0$;
 EQ17 .. $T4S - T6 = L = 0$;
 EQ18 .. $T3 - T2S = L = 0$;
 EQ19 .. $T3S - T2 = L = 0$;

EQ20 .. $T1S = E = 580 - S$;
 EQ21 .. $T2S = E = 480 - S$;
 EQ22 .. $T3S = E = 320 - S$;
 EQ23 .. $T4S = E = 420 - S$;

MODEL MYMODEL /ALL/;
 SOLVE MYMODEL USING LP MAXIMIZING S ;
 DISPLAY S.L;

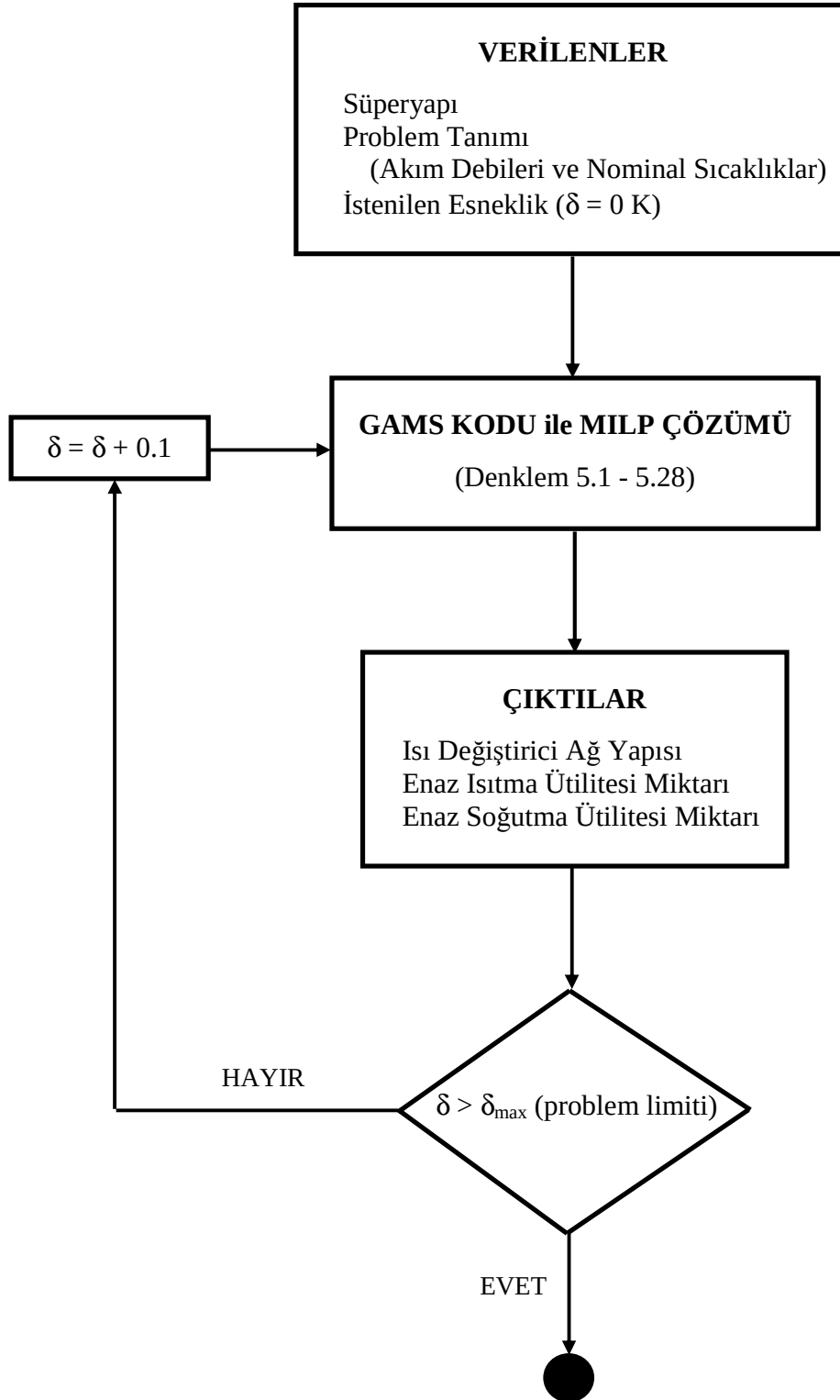
EK-2

GAMS HAKKINDA KISA BİLGİ

GAMS (General Algebraic Modeling System) büyük ve karmaşık matematiksel programlama modellerinin konstrüksiyonu ve çözümü için tasarlanmış bir yazılım/derleyicidir. GAMS şu anda büyük ve karmaşık her tipte (doğrusal programlama (LP), doğrusal-olmayan programlama (NLP), karışık tam sayı doğrusal (MIP) ve karışık tamsayı doğrusal-olmayan programlama (MINLP)) eniyileme problemi için geliştirilmiş tek yüksek seviyeli dildir. Programın sunduğu dilin yapısı sayesinde, çok büyük ve karmaşık modeller çok hızlı geliştirilebilmekte, modifikasyonlar çok hızlı ve emniyetli bir şekilde yapılabilen ve bu sayede eniyileme problemleri üzerinde çok hızlı ve verimli çalışılabilmektedir. Derleyici, problemlerin çözümünde, eniyileme problem tipleri (LP, NLP, MIP, MINLP) için bugüne kadar geliştirilmiş en yaygın/bilimsel kabul gören çözüm algoritmalarını (modüler olarak kullanılan) kullanıcının istediğine bağlı olarak kullanabilmektedir (LP için: CPLEX, MIP için: CPLEX, OSL, XA, NLP için: MINOS, CONOPT, MINLP için: DICOPT). GAMS/XA modülü, doğrusal programlama (Linear Programming, LP) ve karışık tamsayı programlama (Mixed Integer Programming, MIP) problemlerinin çözümü için kullanılmaktadır. Modül modelin mümkün olan en etkin çözümü için birçok seçenek ve ayar parametreleri sunmaktadır. Fakat GAMS/XA birçok durumda bu seçenekleri kullanmaya gerek kalmadan oldukça tatminkar sonuçlar vermektedir.

EK-3

**ENÇOK ESNEKLİĞE KADAR HESAP YÖNTEMİNİ
GÖSTEREN AKIŞ DİAGRAMI**



EK-4

**İSTENİLEN ESNEKLİK İNDEKSİ İÇİN TEK PERİYOTLU
ISI DEĞİŞTİRİCİ AĞ PROBLEMİNİN SÜPERYAPI
TABANLI MILP FORMÜLASYONU İLE ÇÖZÜMÜ**

*Bu model istenilen esneklik indeksinde minimum işletme maliyeti ile
 *çalışan ısı değiştirici ağlarının tasarımı için kullanılmaktadır.
 *Süperyapı üç kademededen ve oniki muhtemel ısı değiştiriciden
 *oluşmaktadır.

```
SETS I sıcak akımlar          /1*2/
      J soğuk akımlar          /1*2/
      N bozucu etki yönleri    /1*17/;
```

```
SCALAR NOK   süperyapı kademe sayısı /3/;
```

```
SET  K          sıcaklık bölgeleri nok + 1 /1*4/
      ST(K)      kademeler
      FIRST(K)   birinci sıcaklık bölgesi
      LAST(K)    sonuncu sıcaklık bölgesi ;
```

```
ST(K)    = YES$(ORD(K) LT CARD(K)) ;
FIRST(K) = YES$(ORD(K) EQ 1)       ;
LAST(K)  = YES$(ORD(K) EQ CARD(K)) ;
```

PARAMETERS

```
FH(I)          sıcak akımın debisi
FC(J)          soğuk akımın debisi
THIN(I)        sıcak akımın besleme sıcaklığı
THOUT(I,N)     n köşesinde sıcak akımın hedef sıcaklığı
TCIN(J)        soğuk akımın besleme sıcaklığı
THINO(I,N)     n köşesinde değişmiş sıcak akım besleme sıcaklığı
TCINO(J,N)     n köşesinde değişmiş soğuk akım besleme sıcaklığı
TCOUT(J,N)     n köşesinde soğuk akımın hedef sıcaklığı
ECH(I,N)       n köşesinde sıcak akım i için ısı kapasitesi
ECC(J,N)       n köşesinde soğuk akım j için ısı kapasitesi
HUCOST         ısıtma maliyeti
CUCOST         soğutma maliyeti
S              istenilen esneklik indeksi
THUIN          ısıtıcı giriş sıcaklığı
THUOUT(N)      n köşesinde ısıtıcının çıkış sıcaklığı
TCUIN         soğutucu giriş sıcaklığı
TCUOUT(N)      n köşesinde soğutucunun çıkış sıcaklığı
GAMMA(I,J,N)   n köşesinde itici güç için üst sınır
TMAPP          minimum yaklaşım sıcaklığı
COSTHEAT       ısıtma maliyeti
COSTCOOL       soğutma maliyeti
INVCOST        yatırım maliyeti
```

```
BINARY VARIABLES      Z(I,J,K), ZCU(I), ZHU(J) ;
```

POSITIVE VARIABLES

```
TH(I,K,N)            n köşesinde k kademesine girdiğinde sıcak akım
                      i'nin sıcaklığı
```

TC(J,K,N)	n köşesinde k kademesinden çıktığında soğuk akım j'nin sıcaklığı
Q(I,J,K,N)	n köşesinde k kademesinde i ve j arasındaki enerji transferi
QC(I,N)	n köşesinde i ve soğutucu arasındaki enerji transferi
QH(J,N)	n köşesinde j ve ısıtıcı arasındaki enerji transferi
DT(I,J,K,N)	n köşesinde k kademesinde i ve j arasındaki sıcaklık yaklaşımı
DTCU(I,N)	n köşesinde i ve soğutucu arasındaki yaklaşım sıcaklığı
DTHU(J,N)	n köşesinde j ve ısıtıcı arasındaki yaklaşım sıcaklığı
VARIABLE COST	ısı değiştirici, ısıtıcı ve soğutucu maliyeti;
EQUATIONS	
EH(I,K,N)	n köşesinde k kademesinde sıcak akım i için enerji transferi
EQC(I,K,N)	n köşesinde sıcak akım i ile soğutucu arasındaki Enerji transferi
TEH(I,N)	n köşesinde sıcak akım i için toplam enerji transferi
EC(J,K,N)	n köşesinde k kademesinde soğuk akım j için enerji transferi
EQH(J,K,N)	n köşesinde soğuk akım j ile ısıtıcı arasındaki enerji transferi
TEC(J,N)	n köşesinde soğuk akım j için toplam enerji transferi
MONTH(I,K,N)	th'ın n köşesinde k kademesinde monotinisisi
MONTC(J,K,N)	tc'ın n köşesinde k kademesinde monotinisisi
MONTHL(I,K,N)	th'ın n köşesinde son sıcaklık bölgesinde monotinisisi
MONTCF(J,K,N)	tc'ın n köşesinde ilk sıcaklık bölgesinde monotinisisi
TINH(I,K,N)	n köşesinde sıcak akımın besleme sıcaklığı
TINC(J,K,N)	n köşesinde soğuk akımın besleme akım sıcaklığı
LOGQ(I,J,K,N)	n köşesinde q üzerinde mantıksal tahditler
LOGQH(J,N)	n köşesinde qhjn üzerindeki mantıksal tahditler
LOGQC(I,N)	n köşesinde qcjn üzerindeki mantıksal tahditler
LOGDTH(I,J,K,N)	n köşesinde sıcak uçta dt üzerindeki mantıksal tahditler
LOGDTC(I,J,K,N)	n köşesinde soğuk uçta dt üzerindeki mantıksal tahditler
LOGDTCU(I,K,N)	n köşesinde dtcu üzerindeki mantıksal tahditler
LOGDTHU(J,K,N)	n köşesinde dthu üzerindeki mantıksal tahditler
EK1	istenilen ısı değiştirici sayısı
OBJ	amaç fonksiyonu ;

* sıcak

```
THIN('1')=580; THOUT('1',N)=360; FH('1')=10;
THIN('2')=480; THOUT('2',N)=320; FH('2')=15;
```

* soğuk

```
TCIN('1')=320; TCOUT('1',N)=460; FC('1')=13;
TCIN('2')=420; TCOUT('2',N)=520; FC('2')=20;
```

* maliyetler

```
HUCOST =1; THUIN =680; THUOUT(N) =680;
CUCOST =1; TCUIN =300; TCUOUT(N) =320;
```

```
TMAPP = 10;
```

```
S =100 ;
```

```
TABLE RI(I,N)   XXX
      1  2  3  4  5  6  7  8  9  10 11 12 13 14 15 16 17
1  0  1  1  1  1  1  1  1  1  -1 -1 -1 -1 -1 -1 -1 -1
2  0  1  1  1  1 -1 -1 -1 -1  1  1  1  1 -1 -1 -1 -1 ;
```

```
TABLE RJ(J,N)   YYY
      1  2  3  4  5  6  7  8  9  10 11 12 13 14 15 16 17
1  0  1  1 -1 -1  1  1 -1 -1  1  1 -1 -1  1  1 -1 -1
2  0  1 -1  1 -1  1 -1  1 -1  1 -1  1 -1  1 -1  1 -1 ;
```

```
THINO(I,N) = THIN(I) + RI(I,N)*S ;
TCINO(J,N) = TCIN(J) + RJ(J,N)*S ;
```

```
TEH(I,N).. (THINO(I,N)-THOUT(I,N))*FH(I) =E= SUM((J,ST), Q(I,J,ST,N))
+ QC(I,N) ;
TEC(J,N).. (TCOUT(J,N)-TCINO(J,N))*FC(J) =E= SUM((I,ST), Q(I,J,ST,N))
+ QH(J,N) ;
```

```
EH(I,K,N)$ST(K).. FH(I)*(TH(I,K,N) - TH(I,K+1,N)) =E= SUM(J,
Q(I,J,K,N)) ;
EC(J,K,N)$ST(K).. FC(J)*(TC(J,K,N) - TC(J,K+1,N)) =E=
SUM(I,Q(I,J,K,N)) ;
```

```
TINH(I,K,N)$FIRST(K).. THINO(I,N) =E= TH(I,K,N) ;
TINC(J,K,N)$LAST(K).. TCINO(J,N) =E= TC(J,K,N) ;
```

```
MONTH(I,K,N)$ST(K).. TH(I,K,N) =G= TH(I,K+1,N) ;
MONTC(J,K,N)$ST(K).. TC(J,K,N) =G= TC(J,K+1,N) ;
```

```
MONTHL(I,K,N)$LAST(K).. TH(I,K,N) =G= THOUT(I,N) ;
MONTCF(J,K,N)$FIRST(K).. TCOUT(J,N) =G= TC(J,K,N) ;
```

```
EQC(I,K,N)$LAST(K).. FH(I)*(TH(I,K,N) - THOUT(I,N)) =E= QC(I,N) ;
EQH(J,K,N)$FIRST(K).. FC(J)*(TCOUT(J,N) - TC(J,K,N)) =E= QH(J,N) ;
```

LOGQ(I, J, K, N)\$ST(K)..Q(I, J, K, N) - MIN(ECH(I, N), ECC(J, N))*Z(I, J, K) =L= 0 ;

LOGQC(I, N)..QC(I, N) - ECH(I, N)*ZCU(I) =L= 0 ;

LOGQH(J, N)..QH(J, N) - ECC(J, N)*ZHU(J) =L= 0 ;

LOGDTH(I, J, K, N)\$ST(K)..DT(I, J, K, N) =L= TH(I, K, N) - TC(J, K, N) +
GAMMA(I, J, N)*(1 - Z(I, J, K)) ;

LOGDTC(I, J, K, N)\$ST(K)..DT(I, J, K+1, N) =L= TH(I, K+1, N)-TC(J, K+1, N) +
GAMMA(I, J, N)*(1 - Z(I, J, K)) ;

LOGDTHU(J, K, N)\$FIRST(K)..DTHU(J, N) =L= THUOUT(N) - TC(J, K, N);

LOGDTCU(I, K, N)\$LAST(K)..DTCU(I, N) =L= TH(I, K, N) - TCUOUT(N);

EK1 .. Z('1', '1', '1')+ZCU('1')+ZHU('1') +
Z('1', '1', '2')+ZCU('2')+ZHU('2')+
Z('1', '2', '1')+Z('1', '2', '2')+ Z('2', '1', '1')+
Z('2', '1', '2')+ Z('2', '2', '1')+ Z('2', '2', '2')
+Z('1', '1', '3')+Z('1', '2', '3')+
Z('2', '1', '3')+Z('2', '2', '3') =L= 7 ;

OBJ..COST =E= SUM(J, QH(J, '1')*HUCOST) + SUM(I, QC(I, '1')*CUCOST) ;

* sınırlar

DT.LO(I, J, K, '1') = TMAPP ;
DT.LO(I, J, K, '2') = 0 ;
DT.LO(I, J, K, '3') = 0 ;
DT.LO(I, J, K, '4') = 0 ;
DT.LO(I, J, K, '5') = 0 ;
DT.LO(I, J, K, '6') = 0 ;
DT.LO(I, J, K, '7') = 0 ;
DT.LO(I, J, K, '8') = 0 ;
DT.LO(I, J, K, '9') = 0 ;
DT.LO(I, J, K, '10') = 0 ;
DT.LO(I, J, K, '11') = 0 ;
DT.LO(I, J, K, '12') = 0 ;
DT.LO(I, J, K, '13') = 0 ;
DT.LO(I, J, K, '14') = 0 ;
DT.LO(I, J, K, '15') = 0 ;
DT.LO(I, J, K, '16') = 0 ;
DT.LO(I, J, K, '17') = 0 ;
DTHU.LO(J, '1') = TMAPP ;
DTHU.LO(J, '2') = 0 ;
DTHU.LO(J, '3') = 0 ;
DTHU.LO(J, '4') = 0 ;
DTHU.LO(J, '5') = 0 ;
DTHU.LO(J, '6') = 0 ;
DTHU.LO(J, '7') = 0 ;
DTHU.LO(J, '8') = 0 ;
DTHU.LO(J, '9') = 0 ;
DTHU.LO(J, '10') = 0 ;
DTHU.LO(J, '11') = 0 ;

```

DTHU.LO(J, '12') = 0 ;
DTHU.LO(J, '13') = 0 ;
DTHU.LO(J, '14') = 0 ;
DTHU.LO(J, '15') = 0 ;
DTHU.LO(J, '16') = 0 ;
DTHU.LO(J, '17') = 0 ;
DTCU.LO(I, '1') = TMAPP ;
DTCU.LO(I, '2') = 0 ;
DTCU.LO(I, '3') = 0 ;
DTCU.LO(I, '4') = 0 ;
DTCU.LO(I, '5') = 0 ;
DTCU.LO(I, '6') = 0 ;
DTCU.LO(I, '7') = 0 ;
DTCU.LO(I, '8') = 0 ;
DTCU.LO(I, '9') = 0 ;
DTCU.LO(I, '10') = 0 ;
DTCU.LO(I, '11') = 0 ;
DTCU.LO(I, '12') = 0 ;
DTCU.LO(I, '13') = 0 ;
DTCU.LO(I, '14') = 0 ;
DTCU.LO(I, '15') = 0 ;
DTCU.LO(I, '16') = 0 ;
DTCU.LO(I, '17') = 0 ;

TH.UP(I, K, N) = THINO(I, N) ;
TH.LO(I, K, N) = THOUT(I, N) ;
TC.UP(J, K, N) = TCOUT(J, N) ;
TC.LO(J, K, N) = TCINO(J, N) ;

```

* başlangıç

```

TH.L(I, K, N) = THINO(I, N) ;
TC.L(J, K, N) = TCINO(J, N) ;

DTHU.L(J, N) = THUOUT(N) - TCINO(J, N) ;
DTCU.L(I, N) = THINO(I, N) - TCUOUT(N) ;

ECH(I, N) = FH(I) * (THINO(I, N) - THOUT(I, N)) ;
ECC(J, N) = FC(J) * (TCOUT(J, N) - TCINO(J, N)) ;

GAMMA(I, J, N) = MAX(0, TCINO(J, N) - THINO(I, N), TCINO(J, N) - THOUT(I, N),
                    TCOUT(J, N) - THINO(I, N), TCOUT(J, N) - THOUT(I, N)) ;

DT.L(I, J, K, N) = THINO(I, N) - TCINO(J, N) ;

Q.L(I, J, K, N)$ST(K) = MIN(ECH(I, N), ECC(J, N)) ;

```

MODEL SUPER/ALL/ ;

```

OPTION OPTCR      = 0 ;
OPTION LIMROW     = 0 ;
OPTION LIMCOL     = 0 ;
OPTION SOLPRINT   = OFF ;
OPTION SYSOUT     = OFF ;
OPTION ITERLIM    = 100000 ;

```

```
OPTION RESLIM    = 10000 ;
```

```
SOLVE SUPER USING MIP MINIMIZING COST ;
```

```
* ısıtma ve soğutma maliyetleri
```

```
COSTHEAT = SUM(J,QH.L(J,'1')*HUCOST) ;
COSTCOOL = SUM(I,QC.L(I,'1')*CUCOST) ;
```

```
DISPLAY COSTHEAT, COSTCOOL ;
```

```
* toplam işletme maliyeti
```

```
COST.L = COSTHEAT + COSTCOOL ;
```

```
DISPLAY COST.L ;
```

```
DISPLAY S ;
```

```
DISPLAY Z.L,ZCU.L,ZHU.L ;
```

```
FILE MMMM /ALP005.0U2/;
```

```
PUT MMMM;
```

```
PUT S:9:5
```

```
PUT
```

```
Z.L('1','1','1'):5:0,Z.L('1','2','1'):3:0,Z.L('2','1','1'):3:0,Z.L('2',  
'2','1'):5:0
```

```
PUT
```

```
Z.L('1','1','2'):5:0,Z.L('1','2','2'):3:0,Z.L('2','1','2'):3:0,Z.L('2',  
'2','2'):5:0
```

```
PUT
```

```
Z.L('1','1','3'):5:0,Z.L('1','2','3'):3:0,Z.L('2','1','3'):3:0,Z.L('2',  
'2','3'):5:0
```

```
PUT ''/
```

```
PUT ZCU.L('1'):5:0,ZCU.L('2'):3:0
```

```
PUT ZHU.L('1'):5:0,ZHU.L('2'):3:0
```

```
PUT COSTHEAT:9:1,COSTCOOL:8:1,COST.L:9:1
```

EK-5

**HER PERİYODU İÇİN İSTENİLEN ESNEKLİK
İNDEKSİNDE İKİ PERİYOTLU ISI DEĞİŞTİRİCİ AĞ
PROBLEMİNİN SÜPERYAPI TABANLI MILP
FORMÜLASYONU İLE ÇÖZÜMÜ**

*Bu model her periyodu için istenilen esneklik indeksinde minimum
 *işletme maliyeti ile çalışan çoklu ısı değiştirici ağlarının
 *tasarımı için kullanılmaktadır. Süperyapı üç kademeden ve oniki
 *muhtemel ısı değiştiriciden oluşmaktadır.

SETS I birinci periyot için sıcak akımlar /1*2/
 J birinci periyot için soğuk akımlar /1*2/
 P ikinci periyot için sıcak akımlar /1*2/
 R ikinci periyot için soğuk akımlar /1*2/
 N bozucu etkiler /1*17/;

SCALAR NOK süperyapı kademe sayısı / 3 /;

SET K sıcaklık bölgeleri nok + 1 /1*4/
 ST(K) kademeler
 FIRST(K) birinci sıcaklık bölgesi
 LAST(K) sonuncu sıcaklık bölgesi

ST(K) = YES\$(ORD(K) LT CARD(K)) ;
 FIRST(K) = YES\$(ORD(K) EQ 1) ;
 LAST(K) = YES\$(ORD(K) EQ CARD(K)) ;

PARAMETERS

FH(I) birinci periyot için sıcak akımların debisi
 FC(J) birinci periyot için soğuk akımların debisi
 THIN(I) birinci periyot için sıcak akımların besleme sıcaklıkları
 THOUT(I,N) n köşesinde birinci periyot için sıcak akımların hedef sıcaklıkları
 TCIN(J) birinci periyot için soğuk akımların besleme sıcaklıkları
 THINO(I,N) n köşesinde birinci periyot için sıcak akımların değişmiş besleme sıcaklıkları
 TCINO(J,N) n köşesinde birinci periyot için soğuk akımların değişmiş besleme sıcaklıkları
 TCOUT(J,N) n köşesinde birinci periyot için soğuk akımların hedef sıcaklıkları
 ECH(I,N) n köşesinde birinci periyotta i akımının ısı yükü
 ECC(J,N) n köşesinde birinci periyotta j akımının ısı yükü
 FHP(P) ikinci periyot için sıcak akımların debisi
 FCR(R) ikinci periyot için soğuk akımların debisi
 THINP(P) ikinci periyot için sıcak akımların besleme sıcaklıkları
 THOUTP(P,N) n köşesinde birinci periyot için sıcak akımların hedef sıcaklıkları
 TCINR(R) ikinci periyot için soğuk akımların besleme sıcaklıkları
 THINOP(P,N) n köşesinde ikinci periyot için sıcak akımların değişmiş besleme sıcaklıkları
 TCINOR(R,N) n köşesinde ikinci periyot için soğuk akımların

TCOUTR(R,N)	değişmiş besleme sıcaklıkları n köşesinde ikinci periyot için soğuk akımların hedef sıcaklıkları
ECHP(P,N)	n köşesinde ikinci periyotta p akımının ısı yükü
ECCR(R,N)	n köşesinde ikinci periyotta r akımının ısı yükü
HUCOST	ısıtma maliyeti
CUCOST	soğutma maliyeti
S	birinci periyot için istenilen esneklik indeksi
SS	ikinci periyot için istenilen esneklik indeksi
THUIN	ısıtıcının giriş sıcaklığı
THUOUT(N)	n köşesinde ısıtıcının çıkış sıcaklığı
TCUIN	soğutucunun giriş sıcaklığı
TCUOUT(N)	n köşesinde soğutucunun çıkış sıcaklığı
GAMMA(I,J,N)	n köşesinde birinci periyot için itici güçün üst sınırı
GAMMAX(P,R,N)	n köşesinde ikinci periyot için itici güçün üst sınırı
TMAPP	minimum yaklaşım sıcaklığı
COSTHEAT	ısıtma maliyeti
COSTCOOL	soğutma maliyeti
INVCOST	yatırım maliyeti
BINARY VARIABLES	Z(I,J,K), ZCU(I), ZHU(J), ZX(P,R,K), ZCUP(P), ZHUR(R) ;
POSITIVE VARIABLES	
TH(I,K,N)	n köşesinde birinci periyotta k kademesine girdiğinde sıcak akım i'nin sıcaklığı
TC(J,K,N)	n köşesinde birinci periyotta k kademesinden çıktığında soğuk akım j'nin sıcaklığı
Q(I,J,K,N)	n köşesinde birinci periyotta k kademesinde i ve j arasındaki ısı transferi
QC(I,N)	n köşesinde birinci periyotta i ve soğutucu arasındaki ısı transferi
QH(J,N)	n köşesinde birinci periyotta j ve ısıtıcı arasındaki ısı transferi
DT(I,J,K,N)	n köşesinde birinci periyotta k kademesine i ve j arasındaki sıcaklık yaklaşımı
DTCU(I,N)	n köşesinde birinci periyotta sıcak akım i'nin soğutucu ile yaklaşım sıcaklığı
DTHU(J,N)	n köşesinde birinci periyotta soğuk akım j'nin ısıtıcı ile yaklaşım sıcaklığı
THP(P,K,N)	n köşesinde ikinci periyotta k kademesine girdiğinde sıcak akım p'nin sıcaklığı
TCR(R,K,N)	n köşesinde ikinci periyotta k kademesinden çıktığında soğuk akım r'nin sıcaklığı
QP(P,R,K,N)	n köşesinde ikinci periyotta k kademesinde p ve r arasındaki ısı transferi
QCP(P,N)	n köşesinde ikinci periyotta p ve soğutucu arasındaki ısı transferi
QHR(R,N)	n köşesinde ikinci periyotta r ve ısıtıcı arasındaki ısı transferi
DTP(P,R,K,N)	n köşesinde ikinci periyotta k kademesine p ve r arasındaki sıcaklık yaklaşımı
DTCUP(P,N)	n köşesinde ikinci periyotta sıcak akım p'nin soğutucu ile yaklaşım sıcaklığı
DTHUR(R,N)	n köşesinde ikinci periyotta soğuk akım r'nin

	ısıtıcı ile yaklaşım sıcaklığı ;
VARIABLE COST	ısıtıcı ve soğutucu maliyetleri;
EQUATIONS	
EH(I,K,N)	n köşesinde birinci periyotta k kademesinde sıcak akım i için enerji transferi
EQC(I,K,N)	n köşesinde birinci periyotta k kademesinde sıcak akım i tarafından transfer edilen enerji
TEH(I,N)	n köşesinde birinci periyotta sıcak akım i için toplam enerji transferi
EC(J,K,N)	n köşesinde birinci periyotta k kademesinde soğuk akım j için enerji transferi
EQH(J,K,N)	n köşesinde birinci periyotta k kademesinde soğuk akım j tarafından transfer edilen enerji
TEC(J,N)	n köşesinde birinci periyotta soğuk akım j için toplam enerji transferi
MONTH(I,K,N)	th'ın n köşesinde k kademesinde birinci periyot için monotinisisi
MONTC(J,K,N)	tc'ın n köşesinde k kademesinde birinci periyot için monotinisisi
MONTHL(I,K,N)	th'ın n köşesinde birinci periyot için ilk sıcaklık bölgesinde monotinisisi
MONTCF(J,K,N)	tc'ın n köşesinde birinci periyotta son sıcaklık bölgesinde monotinisisi
TINH(I,K,N)	n köşesinde birinci periyotta sıcak akımın besleme sıcaklığı
TINC(J,K,N)	n köşesinde birinci periyotta soğuk akımın besleme sıcaklığı
LOGQ(I,J,K,N)	n köşesinde birinci periyotta q üzerinde mantıksal tahditler
LOGQH(J,N)	n köşesinde birinci periyotta qhjn üzerindeki mantıksal tahditler
LOGQC(I,N)	n köşesinde birinci periyotta qcın üzerindeki mantıksal tahditler
LOGDTH(I,J,K,N)	n köşesinde birinci periyotta sıcak uçta dt üzerindeki mantıksal tahditler
LOGDTC(I,J,K,N)	n köşesinde birinci periyotta soğuk uçta dc üzerindeki mantıksal tahditler
LOGDTCU(I,K,N)	n köşesinde birinci periyotta dtcu üzerindeki mantıksal tahditler
LOGDTHU(J,K,N)	n köşesinde birinci periyotta dthu üzerindeki mantıksal tahditler
EHP(P,K,N)	n köşesinde ikinci periyotta k kademesinde sıcak akım p için enerji transferi
EQCP(P,K,N)	n köşesinde ikinci periyotta k kademesinde sıcak akım p tarafından transfer edilen enerji
TEHP(P,N)	n köşesinde ikinci periyotta sıcak akım p için toplam enerji transferi
ECR(R,K,N)	n köşesinde ikinci periyotta k kademesinde soğuk akım r için enerji transferi
EQHR(R,K,N)	n köşesinde ikinci periyotta k kademesinde soğuk akım r tarafından transfer edilen enerji
TECR(R,N)	n köşesinde ikinci periyotta soğuk akım r için toplam enerji transferi
MONTHP(P,K,N)	th'ın n köşesinde k kademesinde ikinci periyot için monotinisisi

MONTCCR(R,K,N)	tc'ın n köşesinde k kademesinde birinci periyot için monotinisi
MONTHLP(P,K,N)	th'ın n köşesinde ikinci periyot için ilk sıcaklık bölgesinde monotinisi
MONTCFR(R,K,N)	tc'ın n köşesinde ikinci periyotta son sıcaklık bölgesinde monotinisi
TINHP(P,K,N)	n köşesinde ikinci periyotta sıcak akımın besleme sıcaklığı
TINCR(R,K,N)	n köşesinde ikinci periyotta soğuk akımın besleme sıcaklığı
LOGQP(P,R,K,N)	n köşesinde ikinci periyotta q üzerinde mantıksal tahditler
LOGQHR(R,N)	n köşesinde ikinci periyotta qhjn üzerindeki mantıksal tahditler
LOGQCP(P,N)	n köşesinde ikinci periyotta qcın üzerindeki mantıksal tahditler
LOGDTHP(P,R,K,N)	n köşesinde ikinci periyotta sıcak uçta dt üzerindeki mantıksal tahditler
LOGDTCR(P,R,K,N)	n köşesinde ikinci periyotta soğuk uçta dc üzerindeki mantıksal tahditler
LOGDTCUP(P,K,N)	n köşesinde ikinci periyotta dtcu üzerindeki mantıksal tahditler
LOGDTHUR(R,K,N)	n köşesinde ikinci periyotta dthu üzerindeki mantıksal tahditler
EK1	istenilen esneklik indeksi
EK21	1s1 değiştirici eşitliği
EK22	1s1 değiştirici eşitliği
EK23	1s1 değiştirici eşitliği
EK24	1s1 değiştirici eşitliği
EK25	1s1 değiştirici eşitliği
EK26	1s1 değiştirici eşitliği
EK27	1s1 değiştirici eşitliği
EK28	1s1 değiştirici eşitliği
EK29	1s1 değiştirici eşitliği
EK30	1s1 değiştirici eşitliği
EK31	1s1 değiştirici eşitliği
EK31	1s1 değiştirici eşitliği
ek32	1s1 değiştirici eşitliği
EK3	soğutucu eşitliği
EK4	ısıtıcı eşitliği
EK5	soğutucu eşitliği
EK6	ısıtıcı eşitliği
OBJ	amaç fonksiyonu ;

* sıcak

THIN('1')=650; THOUT(I,N)=370; FH('1')=10;
THIN('2')=590; FH('2')=20;

* soğuk

TCIN('1')=410; TCOUT('1',N)=650; FC('1')=15;

```

TCIN('2')=350;   TCOUT('2',N)=500; FC('2')=13;

* sıcak

THINP('1')=580;   THOUTP('1',N)=360;   FHP('1')=10;
THINP('2')=480;   THOUTP('2',N)=320;   FHP('2')=15;

* soğuk

TCINR('1')=320;   TCOUTR('1',N)=460;   FCR('1')=13;
TCINR('2')=420;   TCOUTR('2',N)=520;   FCR('2')=20;

* maliyetler

HUCOST =1; THUIN  =680; THUOUT(N) =680;
CUCOST =1; TCUIN  =300; TCUOUT(N) =320;

TMAPP = 10;

S =0 ;

SS =0 ;

TABLE RI(I,N)   XXX
      1  2  3  4  5  6  7  8  9  10 11 12 13 14 15 16 17
1  0  1  1  1  1  1  1  1  1  -1  -1  -1  -1  -1  -1  -1
2  0  1  1  1  1  -1  -1  -1  -1  1  1  1  1  -1  -1  -1 ;

TABLE RJ(J,N)   YYY
      1  2  3  4  5  6  7  8  9  10 11 12 13 14 15 16 17
1  0  1  1  -1  -1  1  1  -1  -1  1  1  -1  -1  1  1  -1  -1
2  0  1  -1  1  -1  1  -1  1  -1  1  -1  1  -1  1  -1  1  -1 ;

THINO(I,N) = THIN(I) + RI(I,N)*S ;
TCINO(J,N) = TCIN(J) + RJ(J,N)*S ;

TABLE RP(P,N)   XXX
      1  2  3  4  5  6  7  8  9  10 11 12 13 14 15 16 17
1  0  1  1  1  1  1  1  1  1  -1  -1  -1  -1  -1  -1  -1
2  0  1  1  1  1  -1  -1  -1  -1  1  1  1  1  -1  -1  -1 ;

TABLE RR(R,N)   YYY
      1  2  3  4  5  6  7  8  9  10 11 12 13 14 15 16 17
1  0  1  1  -1  -1  1  1  -1  -1  1  1  -1  -1  1  1  -1  -1
2  0  1  -1  1  -1  1  -1  1  -1  1  -1  1  -1  1  -1  1  -1 ;

THINOP(P,N) = THINP(P) + RP(P,N)*SS ;
TCINOR(R,N) = TCINR(R) + RR(R,N)*SS ;

TEH(I,N).. (THINO(I,N)-THOUT(I,N))*FH(I) =E= SUM((J,ST), Q(I,J,ST,N))
           + QC(I,N) ;
TEC(J,N).. (TCOUT(J,N)-TCINO(J,N))*FC(J) =E= SUM((I,ST), Q(I,J,ST,N))

```

$+ QH(J, N) ;$
 $TEHP(P, N) \dots (THINOP(P, N) - THOUTP(P, N)) * FHP(P) =E= \text{SUM}((R, ST),$
 $QP(P, R, ST, N)) + QCP(P, N) ;$
 $TECR(R, N) \dots (TCOUTR(R, N) - TCINOR(R, N)) * FCR(R) =E= \text{SUM}((P, ST),$
 $QP(P, R, ST, N)) + QHR(R, N) ;$

 $EH(I, K, N) \$ST(K) \dots FH(I) * (TH(I, K, N) - TH(I, K+1, N)) =E= \text{SUM}(J,$
 $Q(I, J, K, N)) ;$
 $EC(J, K, N) \$ST(K) \dots FC(J) * (TC(J, K, N) - TC(J, K+1, N)) =E= \text{SUM}(I,$
 $Q(I, J, K, N)) ;$

 $EHP(P, K, N) \$ST(K) \dots FHP(P) * (THP(P, K, N) - THP(P, K+1, N)) =E= \text{SUM}(R,$
 $QP(P, R, K, N)) ;$
 $ECR(R, K, N) \$ST(K) \dots FCR(R) * (TCR(R, K, N) - TCR(R, K+1, N)) =E= \text{SUM}(P,$
 $QP(P, R, K, N)) ;$

 $TINH(I, K, N) \$FIRST(K) \dots THINO(I, N) =E= TH(I, K, N) ;$
 $TINC(J, K, N) \$LAST(K) \dots TCINO(J, N) =E= TC(J, K, N) ;$

 $TINHP(P, K, N) \$FIRST(K) \dots THINOP(P, N) =E= THP(P, K, N) ;$
 $TINCR(R, K, N) \$LAST(K) \dots TCINOR(R, N) =E= TCR(R, K, N) ;$

 $MONTH(I, K, N) \$ST(K) \dots TH(I, K, N) =G= TH(I, K+1, N) ;$
 $MONTC(J, K, N) \$ST(K) \dots TC(J, K, N) =G= TC(J, K+1, N) ;$

 $MONTHP(P, K, N) \$ST(K) \dots THP(P, K, N) =G= THP(P, K+1, N) ;$
 $MONTCR(R, K, N) \$ST(K) \dots TCR(R, K, N) =G= TCR(R, K+1, N) ;$

 $MONTHL(I, K, N) \$LAST(K) \dots TH(I, K, N) =G= THOUT(I, N) ;$
 $MONTCF(J, K, N) \$FIRST(K) \dots TCOUT(J, N) =G= TC(J, K, N) ;$

 $MONTHLP(P, K, N) \$LAST(K) \dots THP(P, K, N) =G= THOUTP(P, N) ;$
 $MONTCFR(R, K, N) \$FIRST(K) \dots TCOUTR(R, N) =G= TCR(R, K, N) ;$

 $EQC(I, K, N) \$LAST(K) \dots FH(I) * (TH(I, K, N) - THOUT(I, N)) =E= QC(I, N) ;$
 $EQH(J, K, N) \$FIRST(K) \dots FC(J) * (TCOUT(J, N) - TC(J, K, N)) =E= QH(J, N) ;$

 $EQCP(P, K, N) \$LAST(K) \dots FHP(P) * (THP(P, K, N) - THOUTP(P, N)) =E= QCP(P, N)$
 $;$
 $EQHR(R, K, N) \$FIRST(K) \dots FCR(R) * (TCOUTR(R, N) - TCR(R, K, N)) =E= QHR(R, N)$
 $;$

 $LOGQ(I, J, K, N) \$ST(K) \dots Q(I, J, K, N) - \text{MIN}(ECH(I, N), ECC(J, N)) * Z(I, J, K) =L=$
 $0 ;$

 $LOGQP(P, R, K, N) \$ST(K) \dots QP(P, R, K, N) - \text{MIN}(EHP(P, N),$
 $ECCR(R, N)) * ZX(P, R, K) =L= 0 ;$

 $LOGQC(I, N) \dots QC(I, N) - ECH(I, N) * ZCU(I) =L= 0 ;$
 $LOGQH(J, N) \dots QH(J, N) - ECC(J, N) * ZHU(J) =L= 0 ;$

 $LOGQCP(P, N) \dots QCP(P, N) - EHP(P, N) * ZCUP(P) =L= 0 ;$
 $LOGQHR(R, N) \dots QHR(R, N) - ECCR(R, N) * ZHUR(R) =L= 0 ;$

```

LOGDTH(I, J, K, N)$ST(K)..DT(I, J, K, N) =L= TH(I, K, N) - TC(J, K, N) +
      GAMMA(I, J, N)*(1 - Z(I, J, K)) ;

LOGDTC(I, J, K, N)$ST(K)..DT(I, J, K+1, N) =L= TH(I, K+1, N)-TC(J, K+1, N) +
      GAMMA(I, J, N)*(1 - Z(I, J, K)) ;

LOGDTHU(J, K, N)$FIRST(K)..DTHU(J, N) =L= THUOUT(N) - TC(J, K, N);
LOGDTCU(I, K, N)$LAST(K)..DTCU(I, N) =L= TH(I, K, N) - TCUOUT(N);

LOGDTHP(P, R, K, N)$ST(K)..DTP(P, R, K, N) =L= THP(P, K, N) - TCR(R, K, N) +
      GAMMAX(P, R, N)*(1 - ZX(P, R, K)) ;

LOGDTCR(P, R, K, N)$ST(K)..DTP(P, R, K+1, N) =L= THP(P, K+1, N)-TCR(R, K+1, N) +
      GAMMAX(P, R, N)*(1 - ZX(P, R, K)) ;

LOGDTHUR(R, K, N)$FIRST(K)..DTHUR(R, N) =L= THUOUT(N) - TCR(R, K, N);
LOGDTCUP(P, K, N)$LAST(K)..DTCUP(P, N) =L= THP(P, K, N) - TCUOUT(N);

EK1 .. Z('1', '1', '1')+ZCU('1')+ZHU('1') +
      Z('1', '1', '2')+ZCU('2')+ZHU('2')+
      Z('1', '2', '1')+Z('1', '2', '2')+ Z('2', '1', '1')+
      Z('2', '1', '2')+ Z('2', '2', '1')+ Z('2', '2', '2')+
      Z('1', '1', '3')+ Z('1', '2', '3')+
      Z('2', '1', '3') + Z('2', '2', '3')=L= 6 ;

EK21 .. Z('1', '1', '1')=E= ZX('1', '1', '1');
EK22 .. Z('1', '1', '2')=E= ZX('1', '1', '2');
EK23 .. Z('1', '2', '1')=E= ZX('1', '2', '1');
EK24 .. Z('1', '2', '2')=E= ZX('1', '2', '2');
EK25 .. Z('2', '1', '1')=E= ZX('2', '1', '1');
EK26 .. Z('2', '1', '2')=E= ZX('2', '1', '2');
EK27 .. Z('2', '2', '1')=E= ZX('2', '2', '1');
EK28 .. Z('2', '2', '2')=E= ZX('2', '2', '2');
EK29 .. Z('1', '1', '3')=E= ZX('1', '1', '3');
EK30 .. Z('1', '2', '3')=E= ZX('1', '2', '3');
EK31 .. Z('2', '1', '3')=E= ZX('2', '1', '3');
EK32 .. Z('2', '2', '3')=E= ZX('2', '2', '3');

EK3 .. ZCU('1') =E= ZCUP('1');
EK4 .. ZHU('1') =E= ZHUR('1');
EK5 .. ZCU('2') =E= ZCUP('2');
EK6 .. ZHU('2') =E= ZHUR('2');

OBJ..COST =E= (SUM(J, QH(J, '1')*HUCOST) + SUM(I, QC(I, '1')*CUCOST))*1 +
      (SUM(R, QHR(R, '1')*HUCOST) + SUM(P, QCP(P, '1')*CUCOST))*0;

```

* sınırlar

```

DT.LO(I,J,K,'1') = TMAPP ;
DT.LO(I,J,K,'2') = 0 ;
DT.LO(I,J,K,'3') = 0 ;
DT.LO(I,J,K,'4') = 0 ;
DT.LO(I,J,K,'5') = 0 ;
DT.LO(I,J,K,'6') = 0 ;
DT.LO(I,J,K,'7') = 0 ;
DT.LO(I,J,K,'8') = 0 ;
DT.LO(I,J,K,'9') = 0 ;
DT.LO(I,J,K,'10') = 0 ;
DT.LO(I,J,K,'11') = 0 ;
DT.LO(I,J,K,'12') = 0 ;
DT.LO(I,J,K,'13') = 0 ;
DT.LO(I,J,K,'14') = 0 ;
DT.LO(I,J,K,'15') = 0 ;
DT.LO(I,J,K,'16') = 0 ;
DT.LO(I,J,K,'17') = 0 ;
DTHU.LO(J,'1') = TMAPP ;
DTHU.LO(J,'2') = 0 ;
DTHU.LO(J,'3') = 0 ;
DTHU.LO(J,'4') = 0 ;
DTHU.LO(J,'5') = 0 ;
DTHU.LO(J,'6') = 0 ;
DTHU.LO(J,'7') = 0 ;
DTHU.LO(J,'8') = 0 ;
DTHU.LO(J,'9') = 0 ;
DTHU.LO(J,'10') = 0 ;
DTHU.LO(J,'11') = 0 ;
DTHU.LO(J,'12') = 0 ;
DTHU.LO(J,'13') = 0 ;
DTHU.LO(J,'14') = 0 ;
DTHU.LO(J,'15') = 0 ;
DTHU.LO(J,'16') = 0 ;
DTHU.LO(J,'17') = 0 ;
DTCU.LO(I,'1') = TMAPP ;
DTCU.LO(I,'2') = 0 ;
DTCU.LO(I,'3') = 0 ;
DTCU.LO(I,'4') = 0 ;
DTCU.LO(I,'5') = 0 ;
DTCU.LO(I,'6') = 0 ;
DTCU.LO(I,'7') = 0 ;
DTCU.LO(I,'8') = 0 ;
DTCU.LO(I,'9') = 0 ;
DTCU.LO(I,'10') = 0 ;
DTCU.LO(I,'11') = 0 ;
DTCU.LO(I,'12') = 0 ;
DTCU.LO(I,'13') = 0 ;
DTCU.LO(I,'14') = 0 ;
DTCU.LO(I,'15') = 0 ;
DTCU.LO(I,'16') = 0 ;
DTCU.LO(I,'17') = 0 ;

TH.UP(I,K,N) = THINO(I,N) ;
TH.LO(I,K,N) = THOUT(I,N) ;
TC.UP(J,K,N) = TCOUT(J,N) ;
TC.LO(J,K,N) = TCINO(J,N) ;

```

```

DTP.LO(P,R,K,'1') = TMAPP ;
DTP.LO(P,R,K,'2') = 0 ;
DTP.LO(P,R,K,'3') = 0 ;
DTP.LO(P,R,K,'4') = 0 ;
DTP.LO(P,R,K,'5') = 0 ;
DTP.LO(P,R,K,'6') = 0 ;
DTP.LO(P,R,K,'7') = 0 ;
DTP.LO(P,R,K,'8') = 0 ;
DTP.LO(P,R,K,'9') = 0 ;
DTP.LO(P,R,K,'10') = 0 ;
DTP.LO(P,R,K,'11') = 0 ;
DTP.LO(P,R,K,'12') = 0 ;
DTP.LO(P,R,K,'13') = 0 ;
DTP.LO(P,R,K,'14') = 0 ;
DTP.LO(P,R,K,'15') = 0 ;
DTP.LO(P,R,K,'16') = 0 ;
DTP.LO(P,R,K,'17') = 0 ;
DTHUR.LO(R,'1') = TMAPP ;
DTHUR.LO(R,'2') = 0 ;
DTHUR.LO(R,'3') = 0 ;
DTHUR.LO(R,'4') = 0 ;
DTHUR.LO(R,'5') = 0 ;
DTHUR.LO(R,'6') = 0 ;
DTHUR.LO(R,'7') = 0 ;
DTHUR.LO(R,'8') = 0 ;
DTHUR.LO(R,'9') = 0 ;
DTHUR.LO(R,'10') = 0 ;
DTHUR.LO(R,'11') = 0 ;
DTHUR.LO(R,'12') = 0 ;
DTHUR.LO(R,'13') = 0 ;
DTHUR.LO(R,'14') = 0 ;
DTHUR.LO(R,'15') = 0 ;
DTHUR.LO(R,'16') = 0 ;
DTHUR.LO(R,'17') = 0 ;
DTCUP.LO(P,'1') = TMAPP ;
DTCUP.LO(P,'2') = 0 ;
DTCUP.LO(P,'3') = 0 ;
DTCUP.LO(P,'4') = 0 ;
DTCUP.LO(P,'5') = 0 ;
DTCUP.LO(P,'6') = 0 ;
DTCUP.LO(P,'7') = 0 ;
DTCUP.LO(P,'8') = 0 ;
DTCUP.LO(P,'9') = 0 ;
DTCUP.LO(P,'10') = 0 ;
DTCUP.LO(P,'11') = 0 ;
DTCUP.LO(P,'12') = 0 ;
DTCUP.LO(P,'13') = 0 ;
DTCUP.LO(P,'14') = 0 ;
DTCUP.LO(P,'15') = 0 ;
DTCUP.LO(P,'16') = 0 ;
DTCUP.LO(P,'17') = 0 ;

THP.UP(P,K,N) = THINOP(P,N) ;
THP.LO(P,K,N) = THOUTP(P,N) ;
TCR.UP(R,K,N) = TCOUTR(R,N) ;
TCR.LO(R,K,N) = TCINOR(R,N) ;

```

* başlangıç

```

TH.L(I,K,N) = THINO(I,N) ;
TC.L(J,K,N) = TCINO(J,N) ;

DTHU.L(J,N) = THUOUT(N) - TCINO(J,N) ;
DTCU.L(I,N) = THINO(I,N) - TCUOUT(N) ;

ECH(I,N) = FH(I)*(THINO(I,N) - THOUT(I,N)) ;
ECC(J,N) = FC(J)*(TCOUT(J,N) - TCINO(J,N)) ;

GAMMA(I,J,N) = MAX(0,TCINO(J,N) - THINO(I,N), TCINO(J,N) - THOUT(I,N),
                    TCOUT(J,N) - THINO(I,N), TCOUT(J,N) - THOUT(I,N)) ;

DT.L(I,J,K,N) = THINO(I,N) - TCINO(J,N) ;

Q.L(I,J,K,N)$ST(K) = MIN(ECH(I,N),ECC(J,N)) ;

THP.L(P,K,N) = THINOP(P,N) ;
TCR.L(R,K,N) = TCINOR(R,N) ;

DTHUR.L(R,N) = THUOUT(N) - TCINOR(R,N) ;
DTCUP.L(P,N) = THINOP(P,N) - TCUOUT(N) ;

ECHP(P,N) = FHP(P)*(THINOP(P,N) - THOUTP(P,N)) ;
ECCR(R,N) = FCR(R)*(TCOUTR(R,N) - TCINOR(R,N)) ;

GAMMAX(P,R,N) = MAX(0,TCINOR(R,N) - THINOP(P,N), TCINOR(R,N) -
                    THOUTP(P,N),TCOUTR(R,N) - THINOP(P,N), TCOUTR(R,N) - THOUTP(P,N)) ;

DTP.L(P,R,K,N) = THINOP(P,N) - TCINOR(R,N) ;

QP.L(P,R,K,N)$ST(K) = MIN(ECHP(P,N),ECCR(R,N)) ;

MODEL SUPER/ALL/ ;

OPTION OPTCR      = 0 ;
OPTION LIMROW     = 0 ;
OPTION LIMCOL     = 0 ;
OPTION SOLPRINT   = OFF ;
OPTION SYSOUT     = OFF ;
OPTION ITERLIM    = 100000 ;
OPTION RESLIM     = 10000 ;

SOLVE SUPER USING MIP MINIMIZING COST ;

```

* ağırlıklı ısıtma ve soğutma maliyetleri

```

COSTHEAT = (SUM(J,QH.L(J,'1')*HUCOST))/2
            +(SUM(R,QHR.L(R,'1')*HUCOST))/2 ;
COSTCOOL = (SUM(I,QC.L(I,'1')*CUCOST))/2
            +(SUM(P,QCP.L(P,'1')*CUCOST))/2 ;

```

```

DISPLAY COSTHEAT, COSTCOOL ;

* ağırlıklı toplam işletme maliyeti

COST.L = COSTHEAT + COSTCOOL ;

DISPLAY COST.L ;

DISPLAY S ;

DISPLAY Z.L,ZCU.L,ZHU.L ;

FILE RES /period.OUT/ ;
PUT RES ;
PUT 'Z111=',Z.L('1','1','1'):2:0,' ' ;
PUT 'Z112=',Z.L('1','1','2'):2:0,' ' ;
PUT 'Z121=',Z.L('1','2','1'):2:0,' ' ;
PUT 'Z122=',Z.L('1','2','2'):2:0,' ' ;
PUT 'Z211=',Z.L('2','1','1'):2:0,' ' ;
PUT 'Z212=',Z.L('2','1','2'):2:0,' ' ;
PUT 'Z221=',Z.L('2','2','1'):2:0,' ' ;
PUT 'Z222=',Z.L('2','2','2'):2:0,' ' ;

PUT 'Z113=',Z.L('1','1','3'):2:0,' ' ;
PUT 'Z123=',Z.L('1','2','3'):2:0,' ' ;
PUT 'Z213=',Z.L('2','1','3'):2:0,' ' ;
PUT 'Z223=',Z.L('2','2','3'):2:0,' ' ;

PUT ' ' ;
PUT 'ZCU1=',ZCU.L('1'):2:0,' ' ;
PUT 'ZCU2=',ZCU.L('2'):2:0,' ' ;
PUT 'ZHU1=',ZHU.L('1'):2:0,' ' ;
PUT 'ZHU2=',ZHU.L('2'):2:0,' ' ;
PUT 'S=',S

```

