

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ORGANİZE SANAYİİ BÖLGELERİNDE
KOJENERASYON SANTRALİNİN
YER OPTİMİZASYONU**

Makine Mühendisi Bilgehan ARAT

**FBE Makine Mühendisliği Anabilim Dalı Enerji Makinaları Programında
Hazırlanan**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tez Danışmanı : Yard. Doç. Dr. Burhan SUNGU

İSTANBUL, 2006

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ	iv
İNDİSLER	v
KISALTMA LİSTESİ	vi
ŞEKİL LİSTESİ	vii
ÇİZELGE LİSTESİ	ix
ÖNSÖZ	x
ÖZET	xi
ABSTRACT	xii
1. KOJENERASYON SİSTEMLERİNİN YER OPTİMİZASYONU	1
1.1 Giriş	1
1.2 Kojenerasyon santralleri, avantaj ve dezavantajları	2
1.3 Kojenerasyonun Genel Prensibi	4
1.4 Uygulama Alanları.....	5
1.5 Kojenerasyon ve Çevre	6
2. KOJENERASYON SİSTEMLERİ.....	9
2.1 Performans Göstergeleri	9
2.2 Gaz Türbinleri	11
2.3 Buhar Türbinleri	14
2.4 Pistonlu Motorlar	17
2.5 Kombine Çevrimli Kojenerasyon Tesisleri.....	20
3. KOJENERASYON SİSTEMLERİNDE ATIK ISI KAZANIMI	23
3.1 Gaz Türbinleri Atık Isı Geri Kazanımı	23
3.1.1 Egzos gazlarının direkt kullanımı.....	24
3.1.2 Egzos gazlarının ek yanması	24
3.1.3 Atık ısı kazanı.....	24
3.2 Pistonlu Motor Isı Geri Kazanımı	25
3.2.1 Egzos gazı ısı geri kazanımı.....	25
3.2.2 Ceket ısısı geri kazanımı	26
3.2.3 Yağlama yağ/aftercooler ısı geri kazanımı	26
4. OPTİMİZASYON YÖNTEMLERİ	28
4.1 Network (Şebeke) Analizleri.....	28
4.1.1 Temel Tanımlar ve Kavramlar	28
4.2 Maksimum Akış	31
4.3 Çok Terminalli Maksimal Akışlar	32

4.3.1	Çok Kaynaklı Maksimal Akış	32
4.3.2	Çok Kuyulu Maksimal Akış.....	33
4.4	Network'de Kaynak Noktasının Belirlenmesi	34
4.5	En Kısa Yol ve Minimal Yayılma Algoritmaları	36
4.6	İşaretten Bağımsız Arklarla En Kısa Yol:.....	38
4.7	Minimal Yayılma Problemleri.....	39
4.8	Minimum Potansiyel Farkı:.....	41
5.	BUHAR DAĞITIM HATLARININ TASARIM ESASLARI.....	43
5.1	Buhar Dağıtım Hat Çaplarının Tespit Edilmesi	43
5.2	Boru Hattı Yük Analizleri	46
5.3	Buhar Hatları İzolasyonları ve Kayıcı Boru Desteklerinin Tasarımları	47
5.3.1	Buhar Hattı İzolasyonları	47
5.3.2	Buhar ve Kondens Hattı Boru Kayıcıları.....	50
5.3.2.1	Buhar Hattı Kayıcılarının Mesnet Mesafeleri	53
5.3.3	Boru Hatlarının Birim Maliyet Analizleri.....	54
5.4	Bir Organize Sanayii Bölgesindeki Kojenerasyon Santrali	65
5.4.1	Kojenerasyon Santralinin buhar üretim şartları.....	66
5.4.2	Müşteri Ortalama Tüketim Şartları.....	66
5.4.3	OSB de Bulunan Müşteri Dağıtım Hatlarının Modellenmesi	68
5.4.3.1	Network Modelinin Oluşturması	71
5.4.3.2	Uygun Optimizasyon Yönteminin Belirlenmesi	74
5.4.3.3	Optimizasyon için yöntemler	75
5.4.3.4	Sonuç ağaç ve yerleşime göre boru hatlarının tespiti.	98
KAYNAKLAR		107
İNTERNET KAYNAKLARI		107
EKLER		108
Ek 1 $Q=0,1 - 20$ t/h arası kapasiteli hatların, 10 m –100 m arası mesafelerde $dp=0,5$ bar basınç düşümü ile taşıyabilecekleri kapasiteler		109
Ek 2 $Q=0,1 - 20$ t/h arası kapasiteli hatların, 150 m –600 m arası mesafelerde $dp=0,5$ bar basınç düşümü ile taşıyabilecekleri kapasiteler.....		110
ÖZGEÇMİŞ		111

SİMGE LİSTESİ

A	Boru içi kesit alanı (mm^2)
dp	Basınç kaybı (Bar)
f	Sürtünme katsayısı
Lp	Boru hattı uzunluğu (m)
Vs	Akış hızı (m/s)
d	Boru iç Çapı (mm)
Do	Boru dış Çapı (mm)
D _{izo}	İzolasyonlu boru dış çapı (mm)
L _{izo}	İzolasyon (taş yünü) kalınlığı (mm)
Ç _{izo}	İzolasyonlu boru çevresi (mm)
v''	Özgül hacim (m^3/kg)
δ	Sıvı özgül ağırlığı (su için $\delta = 1$)
δ_a	Gaz özgül ağırlığı (Hava için $\delta_a = 1$)
δ_w	Buhar için özgül hacim (m^3/kg)
ρ	Yoğunluk (kg/m^3)
Q	Buhar akış miktarı, debi (t/h)
π	(pi) 3.1415...
RN	Reynold Sayısı
Vis	Buhar viskozitesi (m^2/s)
L	Metalin ısınmadan önceki uzunluğu (m)
a _L	Metalin uzama katsayısı ($\text{m}/\text{m}^0\text{C}$)
ΔL	Metalin uzama miktarı (mm)
Δt	Sıcaklık Farkı (^0C)
φ	Et kalınlığı (mm)
φ_{AL}	Alüminyum izolasyon sacı et kalınlığı (mm)
K _s	Boru desteği (Support) (kg/m)
D _{sac}	İzolasyon Sacı (m^2/m)
D _{TY}	Taş yünü (m^2/m)
B _a	Boya alanı (m^2/m)
Çk	Çelik konstrüksiyon (kg/m)
St	İnşaat (temel) (adet/m)
Q _{in}	Yakıt girişi
Q _u	Kullanılabilir ısı çıkışı

Q_{loss}	Isı kaybı
W_{net}	Güç çıkışı
N_i, N_j	Network aktarma noktaları
N_s	Network başlangıç noktası
N_t	Network bitiş noktası
A_{ij}	N_i den N_j ye giden ark
Y	Bir network de, noktaların herhangi bir alt kümesi
$\hat{Y}$	Networkdeki alt kümenin, networke tümleyeni

İNDİSLER

i	Birim işçilik maliyeti (\$/m), (\$/kg)
s	Birim satınalma maliyeti (\$/m), (\$/kg)

KISALTMA LİSTESİ

OSB	Organize Sanayii Bölgesi
ASTM	American Society of Testing Material
CDG	Kojenerasyon Tasarım Rehberi (Cogeneration Design Guide)
CHE	Amerikan Isıtma, Soğutma ve Havalandırma Mühendisleri Birliği (American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers)
JHE	Ceket Soğutma Suyu Isı Eşanjörü (Jacket Cooling Water Heat Exchanger)
CHP	Bileşik Isı Güç Üretimi (Combined Heat and Power)
EHE	Egzost Gazı Isı Eşanjörü (Exhaust Gas Heat Exchanger)
EIO	Elektrik Isı Oranı
EYO	Enerjiden Yararlanma Oranı
HHV	Üst Isıl Değer (Higher Heating Value)
AIK	Atık Isı Geri Kazanım Kazanı
ISO	Uluslararası Standartlar Organizasyonu (International Standards Organisation)
LHE	Yağlama Yağı Isı Eşanjörü (Lubricating Oil Heat Exchanger)
LHV	Alt Isıl Değer (Lower Heating Value)
PCS	Paket Kojenerasyon Sistemleri (Packaged Cogeneration Systems)
AIK	Atık Isı Kazanı
WHR	Atık Isı Reküperatörü (Waste Heat Recuperator)
LPG	Likit Petrol Gazı (Liquid Petroleum Gas)
LHO	Hafif Fuel Oil (Low Fuel Oil)
HFO	Ağır Fuel Oil (Heavy Fuel Oil)

ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 1.1 Klasik ve kojenerasyon sistemlerine ait enerji akış diyagramları.	3
Şekil 1.2 Kojenerasyon sisteminde enerji akışı	4
Şekil 2.1 Gaz türbini kojenerasyon santrali	13
Şekil 2.2 Elektriksel güç, proses buharı üreten ve bölgesel ısıtmada kullanılan bir karşı basınçlı buhar türbin santralinin basitleştirilmiş diyagramı	15
Şekil 2.3 Üst konfigürasyonlu bir kombine çevrimli gaz türbinli kojenerasyon tesisinin diyagramında AIK ve alt kısımda bulunan kondensasyonlu buhar türbini	21
Şekil 3.1 Gaz/Dizel motorlu kojenerasyon tesisi şeması	26
Şekil 4.1 N_i den N_j ye giden A_{ij} Arkı	29
Şekil 4.2 Yönlü ve yönsüz (Çift yönlüye eşdeğer) arklara örnek	29
Şekil 4.3 Bağlantılı network örneği	29
Şekil 4.4 Bağlantısız network örneği	30
Şekil 4.5 Çok kaynaklı maksimal akış için örnek	33
Şekil 4.6 Çok kuyulu maksimal akış için örnek	33
Şekil 4.7 Network analizi için örnek	35
Şekil 4.8 Yeni durumun genel gösterimi	36
Şekil 4.9 İşaretten bağımsız arklarla en kısa yol için örnek	39
Şekil 4.10 Sekiz yerleşim birimi için örnek network	40
Şekil 4.11 Sekiz yerleşim birimi için en kısa yayılmayı veren sonuç ağaç	41
Şekil 5.1 Buhar borusu tipik izolasyonu	48
Şekil 5.2 DN 15 ve DN 150 arası kayıcı boru destekleri	50
Şekil 5.3 DN15 - DN 150 arası boruların, kayıcı boru destekleri	50
Şekil 5.4 DN150 - DN 600 arası kayıcı boru destekleri	51
Şekil 5.5 DN150 - DN 600 arası kayıcı boru destekleri	51
Şekil 5.6 Boru hattı maliyetini oluşturan unsurların karşılaştırmalı grafiği	64
Şekil 5.7 Çaplarına göre boru hattı toplam maliyetini gösterir grafik (\$/m)	65
Şekil 5.8 Uşak OSB Müşterilerinin Genel Yerleşimde gösterilmesi	71
Şekil 5.9 Uşak OSB Müşterilerinin Genel Yerleşimde olası bağlantı noktalarının gösterilmesi (network modellemesi için ön çalışma)	72
Şekil 5.10 Uşak OSB müşteri buhar dağıtımları için network modeli	73
Şekil 5.11 Minimum yayılmış ağaç (Toplam $L_p=4.333$ m, $Q=16.68$ t/h)	87
Şekil 5.12 Kaynak noktasının minimum güzergahtaki olası konumları	89
Şekil 5.13 Kaynak Noktasının (Santral), bulunan ağaca olası birleşme noktaları	90

Şekil 5.14	Kaynak noktasının (Santral), her bir kuyu noktasına bağlanması durumunda, hat boyunca olası kapasite durumları ve yönleri.....	91
Şekil 5.15	Sonuç ağaç (Minimum potansiyel farklarının olduğu ağaçtır).....	96
Şekil 5.16	Kaynak noktasının, minimum yayılmış ağaçta minimum potansiyel oluşturabilecek noktadan başlayarak dağıtım yapacağı sonuç ağaç. (optimum kaynak noktası yerleşimi)	97
Şekil 5.17	Ark üzerindeki kapasite ve mesafenin gösterilişi.....	100
Şekil 5.18	Sonuç ağaçta (Yeni güzergah) $Q(t/h)$ ve $L_p(m)$ gösterilişi.....	100
Şekil 5.19	Sadeleştirilmiş sonuç ağaç	101
Şekil 5.20	Belirlenen dağıtım hattı üzerinde mesafe, kapasite ve boru çaplarına ait sonuç.	103
Şekil 5.21	Mevcut güzergahın network modeli, boru hattı çapları, kapasite ve mesafeleri.	104

ÇİZELGE LİSTESİ

	Sayfa
Çizelge 2.1 Güç ekipmanı kapasitesine göre EIO karakteristiği(Cogeneration Design Guide).....	10
Çizelge 2.2 Farklı kojenerasyon sistemlerinin karşılaştırılması (A Cogeneration Guide March 2001).....	10
Çizelge 5.1 Boru hattı içindeki su ve buhar için kabul edilebilir akış hızları (ITT GRINNEL-PIPING DESIGN AND ENGINEERING)	43
Çizelge 5.2 Ticari olarak kullanılan bazı fittingslerin eşdeğer boru uzunlukları.....	44
Çizelge 5.3 ASTM standartlarına göre boru çapları ve et kalınlıkları.....	45
Çizelge 5.4 Buhar Hatlarının Çaplarına Göre İzolasyon Bilgileri Çizelgesi.....	48
Çizelge 5.5 DN15 - DN 150 Arası Kayıcı Boru Destek Boyutları	52
Çizelge 5.6 DN150 - DN 600 Arası Kayıcı Boru Destek Boyutları	52
Çizelge 5.7 İzolasyon Kalınlığına Göre Boru Desteği H Mesafesi (DN15 –DN600).....	52
Çizelge 5.8 Boru Hattı Toplam Uzamasına Göre Boru Desteği L Mesafesi (DN15 – DN600).....	53
Çizelge 5.9 Bir Buhar Hattı Üzerindeki Kayıcıların Mesnet Mesafeleri.....	53
Çizelge 5.10 Buhar Hatları Birim Maliyet Analizi-Boru Maliyetleri	58
Çizelge 5.11 Buhar Hatları Birim Maliyet Analizi-Kayıcı Boru Desteği Maliyetleri	59
Çizelge 5.12 Buhar Hatları Birim Maliyet Analizi-İzolasyon	60
Çizelge 5.13 Buhar Hatları Birim Maliyet Analizi-Boya.....	61
Çizelge 5.14 Buhar Hatları Birim Maliyet Analizi-Çelik Köprü ve İnşaat	62
Çizelge 5.15 Buhar Hatları Birim Maliyet Analizi-Özet.....	63
Çizelge 5.16 Mevcut Müşteri Buhar Hatları Dağıtım Metraj ve Debileri.....	67
Çizelge 5.17 OSB1 hattı Müşterileri ve kapasiteleri.....	67
Çizelge 5.18 OSB2 hattı Müşterileri ve kapasiteleri.....	67
Çizelge 5.19 OSB1 hattı Müşterileri ve kapasiteleri.....	68
Çizelge 5.20 Kuyu Noktaları (Müşterilere ait)	70
Çizelge 5.21 Ark kapasiteleri [mesafe (Lp) ve Debi (Q)]	98
Çizelge 5.22 Sadeleştirilmiş Ark kapasiteleri [mesafe (Lp) ve Debi (Q)]	99
Çizelge 5.23 Sonuç Network (Dağıtım Hattı) Tasarım Hesap Sonuçları ve Maliyet	102
Çizelge 5.24 Mevcut Dağıtım Hattına Ait Boru Çapları, Mesafeleri ve Maliyeti	105
Çizelge 5.25 Mevcut Dağıtım Hattı ve Optimizasyonu Yapılmış Hattın Branşmanlarının Karşılaştırılması	106

ÖNSÖZ

Enerji, her türüyle insanlık tarihinin başından beri ve özellikle teknolojinin gelişmesi ile birlikte insan ve endüstri için vazgeçilmez bir unsur oluşturmıştır. Ekonomik ve stratejik öneme sahip olan elektrik ve ısı enerjisi, ülkemizde de en yaygın üretim alanlarından birisi olan kojenerasyon ile sağlanmaktadır. Bu nedenle kojenerasyon, hem elektrik hem de buhar olarak faydalanılması ile endüstrinin vazgeçilmezi olmuştur.

Kojenerasyon Güç Santralleri, bir fabrika için özel olarak hizmet vermenin yanında, bulunmuş oldukları bir Organize Sanayii Bölgesinde, yatırım aşamasında farklı parametrelere göre değerlendirilmektedir. Bununla birlikte, buhar dağıtımı açısından aynı Organize Sanayii Bölgesinde besledikleri müşterilerin kapasite ve konumlarına göre en optimum yerleşimin de dikkate alındığı bir yatırım yaklaşımı ile değerlendirmeye alınmamaktadırlar. Bir Kojenerasyon Santralının, içinde bulunmuş olduğu veya olacağı bir Organize Sanayii Bölgesinde, müşterilerin konumlarına göre olası bağlantı noktaları ve güzergahta en optimum noktaya konması, yatırım maliyetlerinin minimizasyonu açısından büyük bir öneme sahiptir. Santralin yerleşimin optimizasyonu, sağlanması durumunda yatırımın ekonomikliği açısından ülke ve yatırım açısından yarar sağlayacaktır.

Sanayiye kolayca uyarlanabilecek olan bu konuyu seçmemde, katkıları ve destekleri ile yardımını esirgemeyen Sayın Hocam Yard. Doç. Dr. Hasan Hüseyin ERDEM ve Yard. Doç Dr. Burhan SUNGU' ya, verileri sağlamamda ve santrali incelememde katkıları büyük olan Akenerji UŞAK OSB Kojenerasyon Santral Şefi Sayın Çetin Kaplancan'a ve Akenerji Proje Destek Müdürü Sayın Kemal ATİLA'ya ve diğer Akenerji A.Ş. Yönetici ve çalışanlarına, katkılarından dolayı Ahmet Şener AKBAYRAK'a ve Teknopro A.Ş. Genel Koordinatörü Sn. Vedat İŞBİLİR'e teşekkürlerimi bir borç bilir, uzun soluklu çalışmalarım da daima yanımda olan biricik eşim Remziye'ye, umutları bana güç veren ve maddi manevi her zaman yanımda olan sevgili ve canım annem Ülker ve babam Halil ARAT'a saygılarımı sunarım.

ÖZET

Endüstriyel ve ticari her kuruluş, gerek yatırım aşamasında gerekse işletme şartlarında, gittikçe artan rekabet baskılarından dolayı minimum maliyetlerde var olmanın yollarını aramaktadırlar. Organize Sanayii Bölgelerinde toplanmış olmanın avantajlarından faydalanmanın yanında kojenerasyon sistemlerinden yararlanmak isteyen kuruluşlara hizmet vermek amacıyla kurulması planlanan kojenerasyon santrallerinin yatırımlarının minimizasyonunda önemli parametreler mevcuttur.

Gelişen Teknolojik araçlar ve yatırımlar, yanında ihtiyaçları karşılayabilecek olan terminoloji, kavram ve metodolojileriyle birlikte gelmektedir. Bu nedenle matematik formüllerin çözümünde kullanılan Lineer Programlama ve Network Problemlerinin çözüm teknikleri, yatırım ve işletme açısından, rekabetçi piyasa şartlarında ayakta kalabilmenin yolu olan minimum maliyetler konusunda en optimum çözümleri veren, yolları gösteren metodoloji olmaktadır.

Bu çalışmada, bir Organize Sanayi Bölgesindeki, kapasiteleri ve tüketimleri belirli olan müşterilere buhar dağıtması planlanan bir Kojenerasyon Santralinin, buhar dağıtım hatların minimum maliyette olacak şekilde dağıtım güzergahında ve konumunda olması için gerekli parametrelerin belirlenerek çözüme gidilmesi amaçlanmıştır.

Bu amaçla öncelikle Kojenerasyon kavramı incelenmiş sonrasında bir buhar hattı tasarımı için gerekli parametrelerden bahsedilmiş, network analizleri ve optimizasyon çözüm tekniklerine değinilmiştir. Sonuç olarak; Uşak OSB’nde bulunan bir santralden müşterilere olan bir güzergahta, en uygun ve en düşük maliyetli buhar dağıtımının gerçekleştirilebilecek konumu belirlenmiştir. Bu santralin, optimizasyon yapılmadan konumlandırılarak dağıtım güzergahının belirlenmesi ile ortaya çıkan maliyet ile, optimizasyon yapılarak ortaya çıkan maliyet sonuç olarak karşılaştırılarak verilmektedir.

Anahtar Kelimeler: Kojenerasyon, Gaz Türbini, Optimizasyon teknikleri, Yer optimizasyonu, Kojenerasyon Santralinin OSB’nde yer optimizasyonu, network analizleri.

ABSTRACT

Every industrial and commercial institution, either at the stage of investment or under the operating conditions, searches ways of existing with minimum costs due to exponential competition influences. In addition to profiting from the advantages of being gathered at the industrial zone, there are important parameters for minimizing the investments of cogeneration plants which are planned to set up in order to serve for the institutions that want to benefit from the cogeneration systems.

In addition to the developing technological instruments and investments, it carries with the terminologies and concepts with their methodologies. For this reason; Linear Programming and Network Problem solving techniques, which are used to solve mathematical formulas, is the methodology that gives the optimum solutions about the minimum cost subjects in order to survive under competitive market conditions.

In this study, it is aimed to reach the solution of setting the vapour distribution lines with minimum costs along the distribution route for a Cogeneration Power Station which is planned to distribute vapour to the customers with the known capacities and consumptions in an industrial zone by determining required the parameters.

For this purpose, firstly concept of Cogeneration is examined, then parameters that are required for the design of vapour lines are discussed, and finally network analysis and optimisation solution techniques are mentioned. As a result; the distribution route which will be constructed for the customers of Uşak Industrial Zone and its location with the most suitable and low-cost vapour distribution are determined. As a result, costs of mounting this power station and determining the distribution route with and without making optimisation comparative studies are given.

Keywords: Cogeneration, Gas Turbine, Optimisation Techniques, Land Optimisation, Land Optimisation of the Cogeneration Power Plant at the Industrial Zone, Network Analysis.

1. KOJENERASYON SİSTEMLERİNİN YER OPTİMİZASYONU

1.1 Giriş

Kojenerasyon Santralleri belirli bir fabrikaya elektrik ve buhar açısından hizmet verdikleri gibi, belirli bir kapasitede tasarlanarak kurulduklarında bir Organize Sanayii Bölgesinde (O.S.B.) bulunan farklı kapasitede ve konumdaki müşterilerde hizmet verebilirler. Burada ikinci türde olan, bir O.S.B.'nde kurularak belirli kapasite ve konumdaki müşterilere buhar dağıtımını yapması planlanan bir santralin, en ucuz maliyetli buhar dağıtımını gerçekleştirecek şekilde yerleşim alanının belirlenmesi için gerekli yöntemler incelenerek optimum sonuca ulaşılmaya çalışılacaktır. Optimum dağıtım güzergahının ve dolayısıyla bu güzergah içinde de en uygun noktanın seçilmesi için farklı kantitatif karar verme teknikleri incelenerek sistemin modeli kurulacak ve en ekonomik alternatif bulunacaktır. Optimizasyon çözümlemesinde amaç fonksiyon; buhar hatlarının toplam maliyetinin minimizasyonudur.

Belirli bir Organize Sanayii Bölgesinde farklı alternatiflerin denenmesi veya var olan yüzlerce alternatifin tek tek denenmesi gerekli ve yeterli koşulları sağlayan bir çözüm olmadığı gibi bilimsel bir yöntem de oluşturmamaktadır. Bu nedenle belirli matematiksel optimizasyon teknikleri incelenerek en uygun yöntem tespit edilecek ve buhar dağıtım hatlarının yatırımı açısından en uygun çözüm elde edilecektir.

Bir O.S.B'nde Buhar ve Elektrik dağıtımını yapan Kojenerasyon Santrali, müşterileri ile birlikte bir şebeke (network) oluşturmakta ve bu şebekenin analizi gerekmektedir. Bu nedenle çözüm için matematiksel yöntemlere aşağıda değinilecek olup, iyi bir somut örnek oluşturması açısından mevcut olan bir Organize Sanayii Bölgesi incelenerek değerlendirmeye alınacaktır. Bu amaçla, Uşak Organize Sanayii Bölgesinde kurulmuş olan Akenerji Kojenerasyon Santrali ve mevcut müşteriler arasındaki buhar dağıtım hatları 2004-2005 yılları arasındaki verilere göre incelenmiştir. Sonuç olarak, bahsedilecek olan matematiksel tekniklere göre optimizasyonu yapılan buhar dağıtım hatlarının mevcut buhar borusu dağıtım hatlarına göre durumu karşılaştırılarak, optimizasyon yapılarak değerlendirilmesi yapılan sistem ile mevcut sistem arasındaki fark görülecek olup, böyle bir çalışma ile yatırımda sağlanabilecek kazanç görülecektir.

İncelenen olan Santral ve ülkemizde benzeri mevcut olan santrallerde benzeri bir ön çalışma yapılmadan gerçekleştirilen yatırımlarda ciddi miktarlarda yatırım kayıpları söz konusu olabilmektedir. Bu gibi bir çalışmayı zorlaştıran en önemli husus ise Organize

Sanayii Bölgelerinde bulunan müşterilerin kapasitelerinin değişken piyasa şartlarından dolayı süreklilik arz etmemesidir. Fakat bu gibi bir dezavantaj pazar ön araştırmaları ve istatistiksel çalışmalar ile giderilebilir.

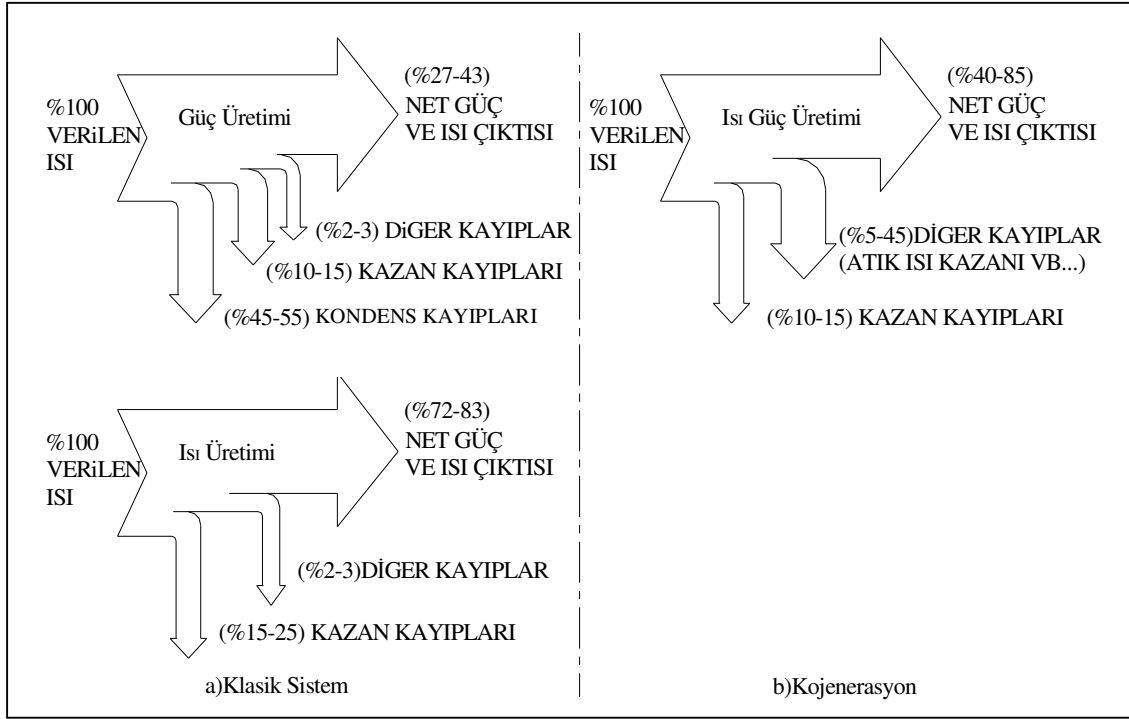
1.2 Kojenerasyon santralleri, avantaj ve dezavantajları

Dünya petrol rezervinin 2050, doğal gazının 2070 ve kömürünün de 2150 yılında tükenmiş olması beklenmektedir (Hepbaşlı,2001). Bu durum, mevcut fosil yakıtlardan daha verimli faydalanma yöntemleri ve alternatif enerji kaynaklarının üzerindeki araştırmaların artmasına sebep olmaktadır. Ayrıca, enerji israfının azaltılması ve enerjiyi yüksek verimle kullanabilecek teknolojik yenilikleri de gerçekleştirmek için yapılacak çalışmaları zorunlu kılmaktadır. Son yıllarda bu çalışmalar içerisinde en çok tercih edileni hem sanayide, hem de konutlarda ihtiyaç duyulan elektrik ve ısı enerjisinin aynı kaynaktan karşılanması olarak tanımlanan kojenerasyon sistemleridir. Bu sistemlerin en önemli avantajları; enerji tasarrufu, çevre kirliliğinin azaltılması ve birincil enerji kaynaklarının hızla tükenmesinin önüne geçilmesidir.

Tüm dünyadaki endüstriyel tesis ve ticari amaçlı yapılar enerjinin başlıca kullanıcılarıdır. Gelişmekte olan ülkelerde, sanayi sektörü toplam enerji talebi içinde elektrik, yaklaşık %20'lik bir paya sahiptir. Talebin geri kalanının büyük bir kısmını ise ısı enerjisi oluşturur. Aynı şekilde, sıcak iklim bölgelerindeki modern ve yüksek yapıların %60 gibi büyük kısmının talebiyse soğutma ve konfor amacıyla doğmuştur. Ayrık sistemlerde, kamuya ait enerji şirketleri elektriği sağlarken, şahıslara ait kazan ve soğutucular da kullanıcıların ısıtma ve soğutma ihtiyaçlarını karşılamaktadırlar.

Gelişmekte olan bir çok ülkede, elektrik üretimi için en önemli kaynak fosil yakıtlı termik santralleridir. Güç santraline sağlanan birincil enerjinin ortalama olarak üçte birinin kullanıcıya elektrik olarak sağlandığı düşünüldüğünde, atılan termal enerjinin önemli miktarda olduğu görülür. Güç üretimindeki atık enerjinin kaynağı, kullanılan termodinamik çevrime bağlı olarak ısının çevredeki suya veya havaya atılması zorunluluğudur. Ayrıca, kullanıcılar üretim yerinden uzakta olabilirler, bu da ek bir iletim ve dağıtım kayıp ve masrafına yol açar. Kojenerasyon kavramının temelini, elektrik üretiminden kaynaklanan atık ısının önemli bir kısmıyla kullanıcıların ısıtma/soğutma talebinin karşılanması prensibi oluşturur. Bu durumda güç üretiminde kullanılan birincil enerjiden yararlanmada kayda değer bir artış meydana gelir.

Kojenerasyon veya bileşik ısı ve güç sistemi (CHP) iş ve faydalı ısıнын tek bir sistemde, aynı anda üretimi anlamına gelir. Yakıttan elde edilen ısı enerji, verimli bir biçimde elektrik enerjisine ve kullanılabilir ısıya çevrilir. En iyi koşullar altında, faydalı enerji çıktısı yakıt enerjisi girdisinin %85 - %90'lık kısmına denk gelir. Bunun yanında, düşük maliyetli yatırımı, kısa kuruluş süresi, düşük yakıt tüketimi ve bunlarla birlikte çevre kirliliği ve giderek artan yakıt çeşitliliğine bağlı olarak dünya çapında tipik güç ve ısı üretim seçeneklerinin yerini alacak cazip bir alternatif olarak bilinmektedir. Kojenerasyon sistemleri ile özellikle yüksek teknoloji ürünü olan bilgisayar ve elektronik kumandalı sistemler kullanan tesislerde ihtiyaç duyulan kaliteli elektrik enerjisi sağlanmaktadır. Şekil 1.1'de elektrik ve ısı enerjisinin ayrı ayrı üretildiği klasik sistem ile kojenerasyon sisteminin enerji akış diyagramları verilmektedir. Şekilden de görüldüğü gibi kojenerasyon sisteminde hem elektrik hemde ısı olmak üzere iki enerji üretilmektedir. Buna karşılık ilave bir yakıt yakılmadığından yakıtın enerjisinden daha fazla yararlanılmaktadır.



Şekil 1.1 Klasik ve kojenerasyon sistemlerine ait enerji akış diyagramları.

Kojenerasyon kavramı yüzyılı aşkın bir süredir bilinmesine rağmen, popülaritesini ve yükselen ilgiyi 70'lerin ikinci yarısı ve 80'lerin başlarında kazanmıştır. Bu duruma gelinmesinin başlıca etkenleri, düşük masraflı ve klasik büyük çaplı elektrik üretim üniteleri ile rekabet edebilen verimli ve küçük çaplı kojenerasyon sistemlerinin doğmasına ve enerji

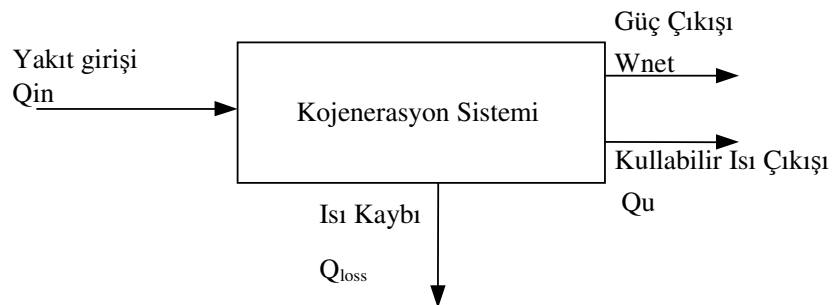
fiyatlarındaki oynamalara yol açan iki petrol şokudur.

Kojenerasyonun son zamanlarda önem kazanmasının asıl nedenleri hızla artan elektrik talebi, devletin talep artışını karşılamak için kurmak zorunda olduğu ilave tesisleri finanse etmesindeki zorluklar ve enerji kullanımına bağlı olarak çevre emisyonları ve kirliliği sınırlandırma konusunda artan endişelerdir. Kojenerasyon günümüzde mevcut tesislerin genişletilmesi, yeni endüstriyel bölgelerin kurulması, zamanı dolmuş buhar üretim sistemlerinin değiştirilmesi gibi gelişmeler planlanıyorsa veya enerjinin maliyeti fazlaysa ve güç satımına olanak varsa tavsiye edilir.

1.3 Kojenerasyonun Genel Prensibi

Kojenerasyonun tanımı, tek bir birincil enerji kaynağından, sırasıyla iki farklı kullanılabilir enerji, yani mekanik enerji ve termal enerji üretmektir. Mekanik enerji, alternatörün elektrik üretmesini sağlamak veya motor, kompresör, pompa ve fan gibi cihazları çalıştırmak için kullanılabilir. Termal enerji, direkt proses uygulamaları veya dolaylı olarak buhar, sıcak su, kurutma için sıcak hava veya soğutma işlemi için soğutulmuş su üretmek amacıyla değerlendirilir. (Derbentli,1998)

Kojenerasyon tesislerinden elde edilen termal enerji, endüstrinin ihtiyacı olan çok farklı sıcaklıkdaki termal enerjinin karşılanmasında bölgesel ısıtma sistemlerinde, ticari bina, hastane, üniversite gibi çok sayıda binanın bulunduğu yerleşkelerde ısıtma ve soğutmanın sağlanmasında kullanılabilir. Bir kojenerasyon tesisinde, birincil enerjinin yakılmasıyla girdi olarak kullanılan ısı (Q_{in}), hem işin elde edilmesi (W_{net}), hem de bölgesel ısıtma ve endüstriyel ısı tedarigi için kullanılan faydalı ısının (Q_u) üretilmesi için kullanılır. (Kartchenko,1998)



Şekil 1.2 Kojenerasyon sisteminde enerji akışı

Yakıt enerjisinin daha verimli kullanılması açısından, kojenerasyon yararlı bir uygulamadır. Buna ek olarak, sırasıyla elektriğin farklı ürünleriyle, konvansiyel güç üretim tesisi ve kazan içerisindeki faydalı ısıyla karşılaştırıldığında kojenerasyon uygulamasının önemli miktarda yakıt enerjisi tasarrufu sağladığı da ortadadır. Klasik yöntemde elektrik enerjisi üretiminde kullanılan konvansiyonel buhar güç tesisleri ve ısı enerjisi üretiminde buhar kazanları kullanıldığı durum ile kojenerasyon sistemi karşılaştırıldığında, kojenerasyon tesisi yakıt enerjisi kullanımında çok daha fazla verimlilik sağlar.

Kojenerasyon santrallerinde elektrik jeneratörünün ihtiyacı olan mekanik enerjiyi üreten ana makina olarak gaz türbini, buhar türbini, diesel motor yada gaz motoru kullanılır. Ana makinadan atılan atık ısı daha sonra atık ısı kazanında veya ısı eşanjörlerinde faydalı ısıya dönüştürülür.

1.4 Uygulama Alanları

Gelişmekte olan ülkelerde, sistemdeki teknik sorunlar nedeniyle veya tüketicinin belirli bir süreyle talep ettiği enerjinin, kurumun kapasitesinin aşması nedeniyle şebekenin güç sağlanmasında aksaklıklarla karşılaşmak yada istenen kalitede elektrik enerjisini sürekli temin edememek mümkündür. Endüstriyel tesisler ve ticari yapılar bu dönemlerde kendilerine gerekli olan yükü garantiye almak için stand-by jeneratörler kullanırlar. Üretim kayıplarını azaltmak ve müşterilerin memnuniyetini minimum düzeyde karşılamak için bazı temel faaliyetlerin devamını sağlamak gereklidir. Stand-by jeneratörler yıl içinde sınırlı olarak kullanılırlar; ayrıca bu cihazlar ilk yatırım, işletmeye alma ve bakım masrafları gerektirmekte ve tesisin toplam enerji masrafını azaltma konusunda da hiç bir katkısı olmamaktadır.

Bu jeneratörlerin esas amacı tesisin öncelikli yerlerine acil güç sağlamak olduğu için, bunların ekonomikliliği konusunda bir finansal analiz yapılmamaktadır. Ancak, bu jeneratörlerin kesintisiz güç üretimi sağlaması olasılığı olduğundan, tesisin aylık güç masrafı azaltılabilir. Bunun gibi faydalar, kesintisiz ve daha verimli çalışmak üzere oluşturulan güç üniteleri ile bağlantılı olarak daha yüksek yatırım ihtiyacını gayet iyi bir şekilde karşılayabilir.

Bir gaz türbininde veya motorunda, normalde kullanılan birincil yakıtın üçte biri güce dönüştürülürken, geri kalanı ise 300 - 500°C arasında değişen göreceli olarak yüksek bir sıcaklıkta atık ısı olarak atılır. Bir şekilde termal enerjiye gereksinim olan tesislerde, bu atık ısı ihtiyaç bulunan ısının şartlarına ve düzeyine uymak amacıyla geri kazanılabilir. Örneğin, proses uygulamaları için düşük veya orta basınçta buhar gerekebilir. Güç ünitelerinin (türbin,

dizel motor, vb.) atık gazlarından elde edilen ısı, buhar kazanı veya kurutucular gibi diğer bölgesel ısı geri kazanım sistemlerinde kullanılacak birincil enerji ihtiyacını karşılar.

Kojenerasyon kurulması için en ideal tesis aşağıdaki özellikleri taşır:

- Sürekli elektrik ve ısı enerji talebi;
- Elektrikten daha yüksek ısı enerji talebi;
- Uzun işletme süresi;
- Şebeke elektrik fiyatının yüksek olması
- Uygun yakıtın düşük fiyata bulunması

Tipik kojenerasyon uygulamaları üç temel alanda yapılabilir:

- Konutsal Kojenerasyon: Merkezi ısıtma ve/veya soğutma temin edenler. Kojenerasyon tesisi sanayi siteleri veya şehir merkezinde kurulabilir.
- Endüstriyel Kojenerasyon: Başlıca iki endüstriyel alanda uygulanabilir; yüksek sıcaklıklı ısı enerjisine ihtiyaç duyanlar (rafineriler, gübre, çelik, çimento, seramik ve cam endüstrilerinde) ve düşük sıcaklıklı ısı enerjisine ihtiyaç duyanlar (pompa ve kağıt fabrikaları, tekstil fabrikaları, yiyecek ve içecek fabrikaları, vs...)
- Ticari/Kurumsal Kojenerasyon: Özellikle oteller, hastaneler ve üniversite kampüsleri gibi gece gündüz işletilen yerlerde uygulanabilir.

1.5 Kojenerasyon ve Çevre

Kojenerasyon sistemlerindeki yakıt kullanım oranının artması sistemden atılan CO_2 , CO , SO_2 ve NO_x oranında önemli bir düşüş sağlar. Bu kirlenici gazların her birinin miktarı, büyük oranda kullanılan yakıt türüne ve işletmedeki kojenerasyon teknolojisinin özelliklerine bağlıdır.

CO , tamamlanmamış yanma sonucu ortaya çıkan zehirli bir gazdır ve hava-yakıt oranlarının kontrollerinin yeterli bir düzeye taşınması ile ihmal edilebilecek düzeye kadar azaltılabilir. SO_2 ise, kömür veya fuel oil gibi kükürt içeren yakıtların yanmasıyla ortaya çıkan asidik bir gazdır. Bu gaz doğada asit yağmuruna sebep olur. Gazdaki SO_2 , yoğunlaşma sıcaklığının altına düşürüldüğünde, kükürt içerikli atık gazlar atık ısı geri kazanım ekipmanlarındaki korozyonun ana sebebi haline gelir. NO_x , yakıtın yanması sonucu ortaya çıkan azot oksitlerle havanın bir karışımıdır ve yapısı, hava yakıt oranı, yanma sıcaklığı ve yanma süresi ile tanımlanan yanma şartlarının bir fonksiyonudur. Bu gaz da asit yağmuruna sebep olur ve atmosferde bir kısım kimyasal reaksiyonlar geçirdikten sonra ozon ve sis ile sonuçlanabilir.

Süratli bir gelişim gösteren teknolojiler, temel yakıt olarak doğal gazı kullanan ateşlemeli ve sıkıştırılmalı yanma motorları ile gaz türbinlerine dayalıdır. Pratik olarak doğalgaz, kükürt, azot içermediğinden ve toz partiküllerinden arınmış olduğundan, fosil yakıtlar arasında en temiz olanı olarak kabul edilir.

Yanma odalarının uygun tasarımı ve alev karakteristiğinin kontrolü, motor ve türbinlerde NO_x oluşumunu azaltır. Motor tasarımı, tek başına NO_x oluşumunu ortadan kaldıramaz, bunun yanında NO_x emisyonunu azaltma çabaları, güç çıkışı ve verimi olumsuz etkilerken, CO emisyonunda da artışa sebep olabilir. Bu sebeple, katalitik indirgeme sistemlerine dayalı egsoz NO_x azaltma teknolojileri oldukça düşük bir emisyonu mümkün kılmalıdır.

Gaz motorlarında, emisyon azaltmaya yönelik teknik seçenekler arasında optimal yanma prosesi ve baca gazı temizleme gösterilebilir. Fakir yanma teknikleri, doğal gazı yakıt olarak kullanan kendinden yanmalı motorlar için kullanılır. Aşırı yük basıncı ve hava fazlalığında, (genellikle %35-60) NO_x emisyonu, sanayileşmiş ülkelerin koyduğu standartların altına, 200 mg/m^3 'e çekilebilir. Baca gazı, üç yönlü bir katalist ile temizlenebilir; isminden de anlaşılacağı üzere NO_x , CO ve hidrokarbon emisyonları azaltılır. Bunun verimli bir şekilde gerçekleşmesi için, hava yakıt oranı ve ateşlemenin uygun olarak kontrol altında tutulması yoluyla, sabit bir NO_x - CO oranı yakalanmalıdır.

Gaz türbinlerinden NO_x emisyonunu ortadan kaldırmanın en çok kullanılan 3 yolu; su veya buhar enjeksiyonu, kuru ve düşük NO_x 'li brülörlerin kullanımı ve seçici katalitiğin azaltılmasıdır.

Su veya buhar enjeksiyonu, türbindeki yüksek kütle akış oranına bağlı olarak güç çıkışını yükselten, yerleşmiş tekniklerdir. Bunlar aynı zamanda alev sıcaklığını ve oksijenin kısmi basıncını da düşürmede faydalı olurlar. Böylece NO_x oluşumuna engel olunur. Bu metotla gaz türbininin performansına etki etmeden NO_x oranının düşürülmesinin de bir üst sınırı vardır. Belirli bir su ve buhar enjeksiyonu oranının üzerine çıkıldığında, CO oluşumuna ve yanmamış hidrokarbon emisyonuna yol açan daha büyük alev dengesizliği söz konusudur,

Daha modern gaz türbinleri, su iyileştirme ve basınçlandırma veya yüksek kalitede buhar üretimi masraflarından kaçınmak için, kuru ve düşük NO_x sistemlerini, su veya buhar enjeksiyonuna tercih ederler. Yakıt alev püskürtülmeden önce, bir karışım odasında yanma havasıyla homojen bir karışım oluşturacak şekilde karıştırılarak, pik alev sıcaklığında düşüş sağlanır ve daha az NO_x oluşumuna olanak tanınır. Bu tip sistemler, büyük yüklerle etkili olurlar ancak kısmi yüklerle pek iyi çalışmazlar. Kojenerasyon sisteminin geniş operasyon

şartları aralığına sahip olduğu durumlarda, alevi düşük yüklerde sabit kılmak için küçük bir difüzyonlu pilot alevi bulunduran düşük NO_x 'li karma bir brülör tasarımı devreye girer. (UNESCAP,1998)

Katı çevre standartlarının uygulandığı yerlerde, seçici katalitik çeviriciler baca çıkışı tekniği olarak kullanılabilirler. Azaltıcı bir öğe, (bu çoğunlukla amonyaktır) bir katalistin olduğu durumlarda (bu da genellikle vanadyum oksittir) NO_x 'i azot veya suya dönüştürmek için kullanılır.

Buhar türbinli kojenerasyon sistemlerinde, kükürt ve azot oksit emisyonları, fuel oil yakan kazanlarda önemlidir; oysa partiküller ve azot oksitler, odun yakan kazanlarda göz önünde bulundurulmalıdırlar .

2. KOJENERASYON SİSTEMLERİ

2.1 Performans Göstergeleri

Güç ünitelerinin performanslarını belirlemek, birbirleri ile karşılaştırmak, maliyet hesaplamalarını yapabilmek ve alternatif kojenerasyon kavramlarını değerlendirebilmek için gereklidir. Performans ise termik verim ve güç çıktısıdır. Termik verim, elde edilen net güç üretiminin yakıtın sahip olduğu ısı enerjisi oranı olarak tanımlanır.

$$\eta_{th} = \frac{W_{net}}{Q_{in}} \quad (2.1)$$

Güç sistemlerinde termik verim performans belirlemede kullanılırken kojenerasyon sistemlerinde kullanışlı değildir. Çünkü kojenerasyon sistemlerinde mekanik ve ısı enerjisi olmak üzere iki çıktı vardır ve bunlar enerji formu olarak birbirlerinden farklıdır. Bu nedenle kojenerasyon sistemlerinde güç ve faydalı ısı üretiminde, yakıt enerjisinden faydalanılmasındaki verim ifadesi, enerjiden yararlanma oranı ile karakterize edilir. EYO, yararlanılan toplam enerjinin, yakıtın ısı enerjisine oranıdır.

$$EYO = \frac{W_{net} + Q_u}{Q_{in}} \quad (2.2)$$

Termodinamiğin birinci yasasına göre yararlanma oranı en fazla 1 olabilir. Fakat uygulamada atık ısının tümünden yararlanılamadığı için bu değer 0.7 ile 0.9 arasında olur.

Bir bileşik ısı güç santralinde önemli parametrelerden biri olan EIO, üretilen ısı, faydalı ısıya oranı olarak tanımlanır. Bu değer, termodinamiğin birinci yasasını kullanarak, ısı verimle gösterilebilir.

$$EIO = \frac{W_{net}}{Q_u} = \frac{\eta_{th}}{1 - \eta_{th}} \quad (2.3)$$

Özellikle yeni kurulacak tesislerde termik ve mekanik güç ihtiyaçları ve birbirleriyle oranları sistem seçimi için zorunlu temel faktördür. Aşağıdaki çizelgede çeşitli güç aralıklarındaki pistonlu motorlar ve gaz türbinlerine ait yaklaşık EIO değerleri verilmiştir. Çizelgeden de görüleceği gibi EIO, pistonlu motorlarda, gaz türbinlerine nazaran daha yüksek değerlerdedir. Dolayısıyla elde edilen elektriksel güç miktarı daha fazladır. EIO, kojenerasyon sistemlerinin bu temel ayrımından dolayı, tüketim bölgesinin özelliğine uygun bir ekipman seçiminde etken bir rol oynar.

Çizelge 2.1 Güç ekipmanı kapasitesine göre EIO karakteristiği (Cogeneration Design Guide)

Elektriksel Kapasite (kW)	Güç Ünitesi Tipi	EIO
<100	Motor	0,568-0,682
100-800	Motor	0,568-0,853
800-1500	Motor	0,682-1,137
>1500	Motor	0,974-1,364
<1000	Türbin	0,227-0,426
1000-1500	Türbin	0,426-0,682
5000-15000	Türbin	0,620-0,758
>15000	Türbin	0,682-0,853

Çizelge 2.2 Farklı kojenerasyon sistemlerinin karşılaştırılması (A Cogeneration Guide March 2001)

Kojenerasyon Sistemi	Kullanılan Yakıt	Güç (Mwe)	EIO	Termik verim	EYO	Isı Kalitesi
Kondensasyonlu Buhar türbini	Herhangi bir yakıt	1-100+	3:1 – 8:1+	%10-20	%80 üzeri	2 basınç veya daha fazla buhar
Karşı basınçlı Buhar Türbini	Herhangi bir yakıt	0,5-500	3:1 – 10:1+	%7-20	%80 üzeri	2 basınç veya daha fazla buhar
Kombine Çevrim	Gaz Biogaz Gazyağı LFO LPG Nafta	3-300	1:1-3:1*	%35-55	%73-90	Orta değerlerde buhar yüksek sıcaklıkta sıcak su
Gaz Türbini	Gaz Biogaz Gazyağı HFO LFO LPG Nafta	0.25-50+	1.5:1 5:1*	%25-42	%65-87	Yüksek değerlerde buhar yüksek sıcaklıkta sıcak su
Diesel Motor	Gaz Biogaz Gazyağı HFO LHO Nafta	0.2-20	0.5-13:1* Alfa değeri 0.9-2	%35-45	%65-90	Düşük basınçlı buhar ve düşük ve orta sıcaklıkta su
Gaz Motor	Gaz Biogaz Gazyağı HFO LHO Nafta	0.003-6	1:1-3:1 Alfa değeri 0.9-2	%25-43	%70-92	Düşük ve orta sıcaklıkta su

* Bu sistemlerdeki en yüksek EIO'ları ek yanma ile gerçekleştirilebilmektedir.

2.2 Gaz Türbinleri

En yaygın ve basit gaz türbini çevrimi olan açık çevrim 3 ana ekipmandan oluşur ve Brayton çevrimine göre çalışır.

Çevrimdeki ilk elememan kompresördür. Kompresör, atmosfer basıncındaki havayı alır ve basıncını yanma odası ve gaz türbinini için istenen seviyeye yükseltir. Sıkıştırma sırasında ısı ilave edilmezken, sıkıştırma işinden dolayı sıcaklık artar.

Sıkıştırılmış sıcak hava bir difüzör ile yakıtın enjekte edilip yakıldığı ve sonrasında türbin gazlarının ısısının yükseltildiği sabit basınçlı yanma odasına yollanılır. Difüzör, havanın hızını brülör tarafından kabul edilebilir bir değere indirir. Uygulamada, yanma odası basınç düşüşü % 1 ile %2 aralığındadır. Yanma, türbin egzoz gazlarını azaltan ve sıcaklığını düşüren bol miktardaki hava ile gerçekleşir.

Yanma odasındaki yüksek sıcaklıktaki atık gazlar daha sonra buradan türbine geçirilir. Türbinde, atık gaz enerjisi, kinetik enerjiye ve daha sonra da mekanik işe dönüştürülür. Türbinde açığa çıkan işin, kimi zaman üçte ikisi mertebesine erişebilen büyük bir miktarı kompresörü tahrik etmekte kullanılır. Geri kalan mekanik iş elektrik jenartüründe kullanılır. Türbin çıkışındaki egzoz gazları 400-550°C arasında değişen sıcaklık değerlerine sahiptirler.

Çoğu uygulamada, kompresör ve türbin aynı mil üzerine yerleştirilir. Bu tip türbinler genel olarak sabit hızdaki operasyonlarda kullanılır. Daha küçük makineler daha yüksek hızda dönerler, bu yüzden yük ile güç türbinleri arasındaki bağlantıyı sağlayacak ve özellikle türbinin jeneratörü çalıştırdığı durumlar için bir dişli kutusu gerekmektedir. 15 MW ve daha fazlası büyük türbinler 3.000 rpm ile 3.600 rpm arasında çalışırlar.

İster tek başına basit bir çevrimde kullanılsın, isterse bir buhar türbini ile birleşik çevrimde kullanılsın, gaz türbinleri günümüz kojenerasyon pazarında büyük bir paya sahiptir. Tipik bir gaz türbini temelli uygulama birkaç yüz kW'dan başlar ve 1000 MW'a kadar da çıkar. Ticari gaz türbini paketleri 200 kW ile 150.000 kW arasında yer alırlar. Bu paketler küçük kapasitesi, yüksek dereceli geri kazanılabilir ısı sağlaması, yüksek güvenilirlik ve kullanılabilirlik ile düşük bakım masrafları gibi faydalar sağlarlar.

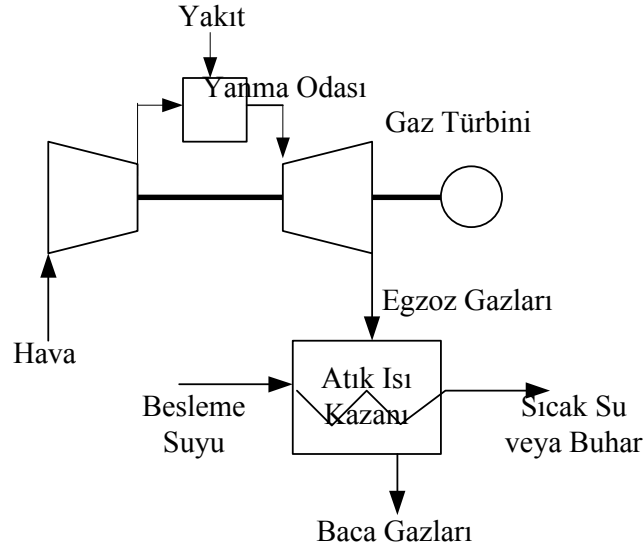
Gaz türbinleri ya ağır hizmet sanayilerinde kullanılmak üzere endüstriyel ve sabit güç uygulamaları için ya da hafif, küçük ve daha verimli bir şekilde uçak motorları için geliştirilmişlerdir. Sabit uygulamalar için modifiye edilmiş, airderivative türbinler genel olarak daha hızlı devreye girerler ve değişen iş yüküne daha çabuk uyabilirler. Her iki türbin

dizaynı da kojenerasyon uygulamalarında kullanılırlar. Bu türbinlerin kojenerasyon endüstrisinde başarılı olması, düşük ilk yatırım maliyetlerinin, yüksek kullanılabilirlik seviyesinin, düşük bakım masraflarının, yakıt değişim olanaklarının, yeniden elde edilebilir yüksek kalite ısının, ve yüksek verimliliğin sonuçlarıdır.

Airderivative gaz türbini, isminden de anlaşılacağı gibi, uçak motoru olarak tasarlanmaktadır. Bu gaz türbinlerinin temel özellikleri, düşük özgül ağırlık, az yakıt tüketimi, dayanıklılıktır. Bu tip gaz türbinlerinin getirdiği belli başlı avantajlar yüksek verim düzeyleri ve bakım olanakları tanıyan küçük ve modüler bir tasarımıdır. Ancak, uzman servis elemanlarına gerek duyulduğundan, bu tip gaz türbinler bakım gerektiğinde, çoğu zaman tesislerin dışına çıkarılırlar. Airderivative gaz türbinleri heavyduty gaz türbinlerine göre daha yüksek bir birim yatırım maliyeti (\$/kWe) ile kaliteli yakıt gereksinim duyarlar ve uzun süreli kullanımların ardından verimlilik ve güç üretimi düşebilir.

Heavyduty gaz türbini olarak da adlandırılan endüstriyel gaz türbini; sabit ve sürekli çalışma için oluşturulmuş sağlam bir ünedir. Verimliliği airderivative tipe oranla daha düşüktür ama genellikle performansını daha uzun bir çalışma periyodunda korur. Bakımı, bulunduğu yerde kolaylıkla yapılabilir ve bakım masrafları düşüktür. Endüstriyel gaz türbini, airderivative tiplerle karşılaştırıldığında, genellikle daha düşük bir yatırım maliyetine sahiptir. Bunun yanında, düşük kalitedeki yakıtla çalışma özelliği de vardır.

Bir gaz türbininin performansı, çevredeki havanın basınç ve sıcaklığına bağlıdır. Bu şartlar günden güne ve işletme yerine göre değişiklik gösterebildiğinden, karşılaştırma amaçlı olarak bir standart referans şartı almak gereklidir. Gaz türbin endüstrisinde kullanılan standart şartlar 15°C, 1,013 Bar ve %60 bağıl nemdir. Bunları Uluslararası Standartlar Organizasyonu belirlemiştir. Gaz türbinlerinin performansı da ISO şartlarına göre belirlenir.



Şekil 2.1 Gaz türbini kojenerasyon santrali

Şekil 2.1 de gaz türbinli kojenerasyon tesisindeki ekipmanlar gösterilmiştir. Genellikle kompresör, yanma odası ve gaz türbinin montajı beraber yapılmakta ve gaz türbini grubu olarak adlandırılmaktadır. Gaz türbini çıkışındaki egzoz gazlarındaki atık ısıyı faydalı enerjiye dönüştürmekte atık ısı kazanı (AIK) kullanılır. Atık ısı kazanı, gaz türbini kojenerasyon sisteminin ana öğelerinden biridir. Atmosfere atılan atık gazın sıcaklığı yüksek olduğundan, atık ısı kazanı bu enerjiyi geri kazanarak, proses buharı üretmek ya da sıcak su üretmek için tasarlanmıştır. 500-550°C deki atık gaz AIK'ında baca gazı sıcaklığı 150°C civarına kadar çekilir. 150°C'lik bir sıcaklık sayesinde atık gazların yoğuşması önlenmiş olacaktır. Düşük sıcaklık düzeylerinde, SO_x ve NO_x gibi gazlar, yoğuşma ile birlikte asit oluşturacak ve AIK'ın malzemesini yıpratırlar.

Gaz türbininin egzoz çıkış sıcaklığı ise 400°C-550°C civarındadır. Burada uygulanacak atık ısı geri kazanma tesisinin verimi, atmosfere bırakılan gaz miktarı ve sıcaklığı ile ilgilidir. Gaz miktarı gaz türbininin gücüne bağlı olduğundan verimi yükseltmek için geriye atık gazların sıcaklığını düşürmek kalmaktadır. 400°C-550°C sıcaklığındaki gazlar bir atık ısı kazanından geçirilerek 100-150°C seviyesine düşürülür ve ilave ısı enerjisi geri kazanılır. Bu şekilde çevrim verimi %30' lardan % 45-75 ler mertebesine yükseltilmiş olur.

Gaz türbinli kojenerasyon sistemleri, son yıllarda doğal gazın büyük çapta kullanılabilir olması, teknolojiye hızlı gelişme, tesis kurma maliyetinin önemli derecede azalması ve daha fazla çevre dostu formunda çalışmaya bağlı olarak büyük bir gelişme kaydetmiştir. Ayrıca, bir projenin geliştirilmesi için geçen süre daha aza inmiş ve donanım da modüler yolla

gönderilebilir hale gelmiştir. Gaz türbininin çalışmaya başlangıç süresi kısadır ve kesintili işletme için esneklik sağlar. Düşük bir ısı geri kazanım verimine sahip olmasına rağmen, daha yüksek derecelerde daha fazla ısı elde edilebilmektedir. Isı çıkışı kullanıcının ihtiyacından fazla ise, ek yakıtı oksijen yönünden zengin egzoz gazıyla karıştırarak termal çıkışı daha verimli hale getirecek ek doğal gaz ateşlemesi yapmak mümkündür.

Kimi gaz türbinlerinin artık ve ham yakıtlarla çalışma becerisine sahip olmasına karşın, bir çok gaz türbini hafif, gazlı veya fuel oil gibi damıtılmış yakıtlarla çalışırlar. Ağır yakıtların kullanılması, yakıt filtreleri, atomizör ve artık temizleme çözümleri gerektirir ki, bunların yapılmaması gaz türbinlerinin sıkça bozulmasına ve tamir görmesine neden olur.

Yanma olayı, türbininin dışında yanma odasında gerçekleşen bir olaydır. Yanmanın güç türbininin dışında gerçekleşmesinden dolayı türbini kapatmaksızın ve türbinin mekanik çıktısına etki yapmaksızın, gaz yakıttan likit yakıta geçiş yapmak mümkündür. Düşük maliyetli ve bir doğal gazdan bir diğerine istenildiği zaman geçilebilme özelliğinden dolayı gaz türbinleri pazarda çok cazip bir ürün olarak yerini almaktadır. Kirli veya ağır yakıtların kullanıldığı durumlarda brülör yerine ısı değiştiricisi kullanılmalıdır.

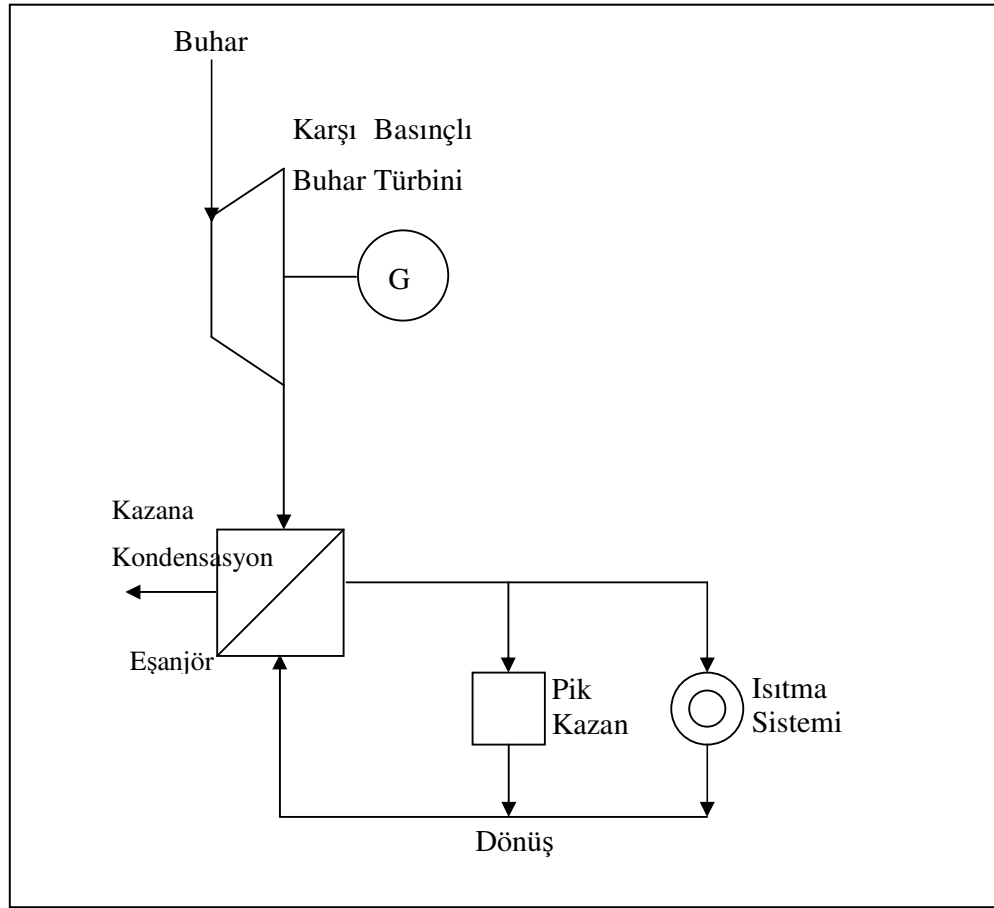
Kapasitesi 50 MW' a kadar olan gaz türbinleri; türbin, dişli kutusu, jeneratör, türbin ve jeneratör kontrolleri, yangın söndürme sistemi ve veri tanıma sistemini içine alan paketler halinde piyasada satılmaktadır. Bu paketler genel olarak ses yalıtım duvarı ile çevrilidirler. İlave olarak eklenen akustik düzeltme çalışmalarıyla bir gaz türbini tamamen gürültüyü yok eder. Diğer güç üniteleriyle karşılaştırıldığında gaz türbinleri hem daha hafif hem de daha küçüktür. Buna ek olarak kurulumları da daha az maliyetlidir. Kurulum için gereken alt yapı çalışmaları, aynı elektriksel kapasitedeki pistonlu motorların kurulumu için gereken alt yapı çalışmalarıyla karşılaştırıldığında, daha az zahmetlidir ve gaz türbinlerinde titreşim ve şok izolasyonu gereksinimi yoktur.

2.3 Buhar Türbinleri

Buhar türbinlerinin, birkaç 100 kW' dan 1000 MW' ın üzerine kadar üretim yapabilen modelleri mevcuttur. Sistem büyüklüğünü arttırmak üzerine odaklanılan çalışmalarla geçen uzun yıllardan sonra, türbin endüstrisi nihayet sistem verimlilik ve kullanılabilirliğini hedef olarak seçmiştir. Enerji özelliklerinden ve çevrimin buhar gücünün de kullanılması gereğinden dolayı, buhar türbini temelli sistemler hafif uygulamalarda ağırlıklı olarak kullanılmaya başlanmıştır. Öte yandan eski sistemler daha orta boy uygulamalara

kaydırılmışlardır. Genişleme sürecinde buharın çeşitli kademelerden çıkarılabilmesi, çevrimdeki termik yeteneklerinin iş yükü ile uyumunu kolaylaştırmıştır.

Karşı basınçlı türbinlerde çürük buhar basıncı atmosfer basıncındadır veya daha üstündedir. Bu türbinler daha çok yüksek basınçlı buhar ve ısı veya endüstriyel proses ihtiyacı olduğunda kullanılırlar. Buharlaşmanın gizli ısısı da dahil, buhar ısının büyük bir kısmının atılması ve sonrasında proste kullanılması dolayısıyla, karşı basınçlı kojenerasyon sistemi proses verimliliği veya toplam enerji verimliliği çok yüksek olabilir. Bunların yanında, karşı basınç türbinli kojenerasyon sistemleri, yoğuşmalı sistemlerine oranla daha az yardımcı ekipmana ihtiyaç duyar, bu da yatırım maliyetini düşürür.



Şekil 2.2 Elektriksel güç, proses buharı üreten ve bölgesel ısıtmada kullanılan bir karşı basınçlı buhar türbin santralini basitleştirilmiş diyagramı

Diğer tip türbinlerle karşılaştırıldığında, kojenerasyon uygulamalarında karşı basınç türbinlerinin kullanılması bir takım dezavantajlar doğurabilir. Proses yükü, buhar için gerekli ısı havuzu olduğundan, türbinden geçen buhar miktarı tesisin ısı yüküne bağlıdır. Böylece, karşı basınç türbini elektrik çıktısı ile elektriksel gereksinimleri eşleştirmede çok fazla

esneklik payı bırakmaz. Elektrik çıkışı termik yük tarafından kontrol edilir. Tesis buhar gereksinimleri ile elektrik çıkışının direkt bağlantısı, elektrik şebekesi atıl servisi veya ilave servis için elektrik masraflarıyla sonuçlanır. Alternatif olarak; atık buhar, direkt olarak atmosfere bırakılabilir. Ancak bu da çok verimsiz bir alternatiftir ve kazanın suyunun ziyan edilmesi anlamına gelir ki bu da maliyetleri olumsuz yönde etkiler. İkinci olarak, türbinin kendisi diğer türbin çeşitlerinden genelde daha büyüktür.

Bir ikinci tip türbin ise buharı atmosfer basıncından daha düşük değerde tüketen türbin olarak da tanımlanan kondensasyonlu türbindir. Aynı giriş koşullarının olduğu durumlarda, kondensasyonlu türbin karşı basınçlı türbin ile kıyaslandığında yüksek kapasiteyle çalışır. Buna ek olarak, düşük sıcaklık değerlerindeki atık buhar koşulları, yüksek türbin verimliliği ile beraber giriş ve çıkışta yüksek ısı farklılıklarına yol açar. Güç üretim çevrimi, egzoz sıcaklığı ve basıncı düşürülerek optimize edilebilir. Bu güç çevrimi optimizasyonu, proste kullanılmak üzere tekrar kazanılır ısıyı ve ısıнын miktarını düşürmekle sağlanır. Türbinin mekanik verimliliği yüksek olabileceği gibi aynı zamanda çevrimin toplam enerji verimliliği düşük olabilir. Bu gibi hallerde, düzgün bir biçimde çalışan yoğunlaşmalı türbinin kullanılması maliyet açısından pek de verimli olmayabilir.

Gaz türbinlerinin tersine, buhar türbini temelli kojenerasyon sistemlerinin başlatılmaları, kazanların ısınmaları için gereken süre de göz önüne alındığında, daha uzun sürer. Başlatma işlemi bazen bir kaç saat sürebilir. Hızlı başlatmanın önemli olduğu durumlarda, başlatma süresini azaltmak için kazanı sıcak tutmak, maliyetler açısından daha verimli olabilir.

Buhar türbini çevrimi maksimum yakıt esnekliği sağlar. Rankine çevrimi sistemleri çeşitli gaz, sıvı, yeniden elde edilebilir atıkları ve endüstri yan ürünlerini de içeren katı yakıtlar ve jeotermal kaynaklar ile çalıştırılabilirler. Sonuçta, unutulmamalıdır ki ısı kaynağı, gaz türbini veya pistonlu motor gibi başka bir güç ünitesinin egzozundan veya kurutma fırını gibi bir endüstriyel prosten oluşabilir. Buharın türbine dışarıdan gelmesi dolayısıyla, yakıt dönüşümünün türbin üzerinde direkt bir etkisi bulunmamaktadır.

Buhar Türbinli kojenerasyon tesisleri kurulumunda iki yol vardır. Proses gereksinimlerine bağlı olarak, proses buharı, besleme suyu ısıtması için çıkarılan buhara benzer biçimde, ya buhar türbininden orta aşamalarda çıkarılır ya da türbin egzozunda çıkarılır ki, buna karşı basınçlı türbin de denir. Proses buhar basınç gereksinimleri ortalama 0.5 ile 40 bar arasında değişir. Bu tip buhar türbinleri kondensasyonlu buhar türbini tipinden egzoz buhar basınç oranı bazında farklılık gösterir. Ortalama 0.04 bar basıncındaki buharı, kondenserden atan

kondensasyonlu türbinin tersine, karşı basınçlı buhar türbininin çıkış basıncı 1 bardan fazladır. Bu egzoz buharının direkt olarak bazı endüstriyel süreçlerde kullanılmasına veya bölgesel ısıtmada suyu ısıtmak için bir ısı değiştiricisi kullanmak suretiyle, dolaylı olarak da kullanılmasına olanak tanır.

Karşı basınçlı buhar türbinli kojenerasyon tesislerinin kullanımı elektrik talebinin ısı talebine göre daha az olduğu durumlarda daha uygundur. Bu, endüstriyel kojenerasyon tesislerinde sıkça kullanılan uygulamadır. Kondensasyonlu türbinli kojenerasyon tesisleri bir çok yararlı ısı/güç uygulamalarında tercih edilir. Geçmişte endüstriyel kojenerasyon sistemlerinin çoğunda buhar türbinleri kullanılırken günümüzde buhar türbinleri pazar payının önemli bir kısmını kaybetmiş bulunmaktadır. Bunun nedeni buhar türbinlerinin gaz türbinleri ile karşılaştırıldığında bazı dezavantajlarının bulunmasıdır.

- Buhar türbinleri daha pahalıdır.
- Buhar türbinlerinin elektrik verimleri daha düşüktür.
- Devreye giriş süreleri daha uzundur.
- Buhar türbini sistemleri daha fazla hacim kaplar.
- Kazanlar ve bunlara ait pek çok yardımcı ekipmana ihtiyaç duyarlar.

2.4 Pistonlu Motorlar

Pistonlu motorlar çoğunlukla düşük veya orta güçteki kojenerasyon ünitelerinde kullanılmaktadır. Pistonlu motorlar, değişik bir çok yakıt ile çalışabilme özelliğine de sahiptirler ve mükemmel kesintisiz servis verme özellikleri ile bilinirler. Motor boyutlarının alt ve üst limitleri çoğunlukla kullanılan yakıtın bir fonksiyonudur. Bu değerler, doğal gaz için 50 kW ile 50 MW ve diesel yakıt için 2.5 MW ile 50 MW arasında değişmektedir. Bu motorların en önemli avantajlarından birisi, diğer güç üniteleriyle karşılaştırıldığında ortaya koydukları yüksek elektrik verimidir.

Pistonlu motorlar, farklı termodinamik ve işletim çevrimlerinde çalışırlar. Ancak, motora karakteristik özelliğini veren basit üç işlem vardır. İlk olarak, yakıtın bir silindir içerisinde önce tutuşturulması ve daha sonra yanmasıdır ki bu yanma neticesinde oluşan gaz genleşir. İkinci işlem, genleşerek hareket eden bir pistonu sıkıştıran bu gazın içerisindeki enerjinin mil gücüne dönüşmesidir. Üçüncü işlem ise, piston ile mil arasında bir bağlantı kullanarak pistonun doğrusal hareketinin mil kolunu çevirmesi hareketine dönüştürülmesidir.

Çok sık görülen bir pistonlu motor termodinamik deviri, yakıtın kıvılcım ile tutuşması

prensibine dayanır ki bu Otto çevrimi olarak da bilinir. Otto çevrimini, her bir motor silindirinde bulunan sıkıştırılmış hava ve yakıt karışımının, dışarıdan sağlanan kıvılcım ile tutuşturulması uygulaması olarak da açıklayabiliriz. Kranka bağlanmış piston, hava ve yakıt karışımının basınca maruz kalmasına neden olur. Yanan yakıt genişler ve pistonu güç uygulayarak, pistonu harekete geçirir böylece iş elde edilir. Otto çevriminin tersine, Dizel çevrimi yakıtı ateşlemek için dışarıdan sağlanan kıvılcımı kullanmaz. Bunun yerine, enjekte edilen yakıt kendiliğinden tutuşur. Bu spontane yanma olayı için gereken ısı, ani basınç hareketi ile ortaya çıkar. Çünkü basınç silindir gazının sıcaklığını artırır. Otto çevriminde, hava ve yakıt karışımı silindirin içerisine enjekte edilip, sıkıştırılırken, dizel çevriminde, sadece çevreyi saran hava sıkıştırılır. Çevrimin bu noktasında, sıkıştırılan hava sıcaklığı, yakıtın tutuşma anındaki sıcaklığından fazla olduğu için, yakıt silindirin içerisine enjekte edilmesiyle, tutuşturma işlemi gerçekleşir. Pistona sabit basınç uygulanması için yakıt akışı kontrol altında tutulur.

Otto çevrimli bir motor; doğal gaz, benzin, propan, işletme yağım gazları, metan gazı gibi değişik bir çok yakıt kullanabilir. Yüksek basınç ve sıcaklıklarda çalışan dizel çevrimli bir motor ise sadece No.2 damıtılmış fuel oil, No.4 fuel oil, No.6 artık fuel oil gibi daha ağır yakıtlarla çalışabilir.

Gaz motorları için güç değerleri, 20 kW ile 1.5 MW arasında değişmektedir. Dizel motorlardan çevrilmiş olan ateşlemeli motorlar ise, doğal gazla çalıştıklarında, 5 kW ile 4MW arasındaki kapasitelerde bulunurlar. Otto motorlarının çalışma süratleri, 750-3000 d/dak arasındadır ve elektrik verimleri de %25-35'tir.

Dizel motorlar; genel olarak, 2 stroklu ve 4 stroklu motorlar olmak üzere 2 ana bölüme ayrılırlar. 2 stroklu motorlar aynı zamanda düşük hızlı motor olarak da bilinir ve her devirde meydana gelen tek ateşleme özelliği ile belirgindir. 200 d/dak' nın altında çalışan ve %45-53'lük yüksek elektrik kapasitesi ile 1-50 MW' lık çıkış sağlaması da bir diğer özelliğidir. 4 stroklu motorda ise, ateşleme birer devir aralıkla meydana gelir ve bu motor iki kategoriye ayrılır. Orta süratteki motorlar 400 ve 1000 d/dak arasında çalışır ve %35- 48'lik elektrik verimiyle 0.2-20 MW çıkış aralığındaki değerler için tasarlanabilirler. Yüksek süratteki motorlar ise 1000-2000 d/dak arası hızlarda çalışır ve %35-40 arası elektrik verimiyle birkaç kW ile 2 MW arası çıkış değerlerinde görev yaparlar. (Lindberg, 1999)

Pistonlu motor kapasitesi, motorun hızı, emişi, çalışma çevrimi gibi hususlar motor dizayn safhasında şekillenirler. Bunun yanında makine kapasitesini etkileyen rakım (hava basıncının

ve yoğunluğunun düşmesi nedeniyle), sıcaklık gibi diğer çevresel faktörleri de unutmamak gerekir. Kıvılcım ateşlemeli Otto çevrimli motorlar , havalandırılma tarzına göre de kategorilendirilebilirler. Doğal havalandırılmalı motorlar havayı veya hava/yakıt karışımını silindire atmosfer basıncında tedarik ederler. Superşarjlı veya turboşarjlı motorlar ise yüksek basınçlı hava veya hava/yakıt karışımını silindire tedarik ederler. Turboşarj, sıradan bir mil yardımı ile santrifüj kompresöre bağlanmış ufak bir türbinin çalıştırılması için makinenin atık gazlarının kullanılması olayıdır. Kompresör içeri alınan havanın basıncını yükseltir. Turboşarj , motor silindirlerine daha çok hava götürür. Böylece silindirlere daha fazla oksijen sağlanmış olur ki, bu da daha fazla yakıtın yanmasına olanak sağlar. Turboşarj, motor bloğunun mekanik verimliliğini %30 ile %40 arasında artırır. Doğal havalandırılmalı motorlara göre de maliyetler açısından daha verimlidir. Turboşarj aynı zamanda yanma ve motor verimliliğini arttırarak yakıt/hava karışımını da arttırır. Aynı zamanda, motorların çalışma saati başına bakım masraflarını da arttırır.

Motor kapasitesi, motor hızının direkt bir fonksiyonudur. Motor hızları; 300 rpm değerinden küçük olanlar düşük hızlı, 300-900 rpm arası orta hızlı ve 900 rpm değerinden büyük olanlar ise yüksek hızlı olarak kategorilendirilir. Yüksek hızlı motorlar, kW başına ilk maliyetleri azaltsa da, daha düşük mekanik verim, sık arızalanma ve yüksek bakım masrafları söz konusudur.

2 stroklu motorlar, 4 stroklu motorlara nazaran hafif bir maliyet avantajına sahiptir. Bununla birlikte 2 stroklu motorlarda verim daha az ve atık ısı miktarı daha fazladır bu da daha büyük ve dolayısıyla daha pahalı bir atık ısı sistemini gerektirir. Sonuç olarak; 2 stroklu motorlar, 4 stroklu motorlarla kıyaslandıklarında daha yüksek bakım masraflarına ve daha düşük kullanılabilirliğe sahiptir.

Pistonlu motorların verimliliği; sıkıştırılmamış silindir gazlarının hacminin asgari silindir hacmine oranı olarak da tanımlanan sıkıştırma oranını da içeren, bir çok faktöre bağlıdır. Yüksek sıkıştırma dereceleri, pistonun bir defalık hareketi sırasında daha çok yakıtın yanmasına olanak sağlar ki, bu da motor kapasitesini arttırır. Hava ile yakıt karışımının sıcaklığının, yakıtın tutuşma anındaki sıcaklığından daha düşük olması gereği Otto çevriminde sıkıştırma oranına sınırlama getirir. Otto çevriminde, yakıt ve hava karışımının, piston optimum pozisyona gelmeden kendiliğinden tutuşmasına ateşleme avansı denir. Ateşleme avansı motor verimliliğinde ve kapasitesinde azalma yaşanmasına neden olur ve şayet devam edecek olursa, aşırı bakım masraflarına ve yetersiz kullanılabilirliğe yol açar. Kıvılcım tutuşturmalı doğal gaz kullanan motorlar 9: 1 ile 12: 1 oranları arası değişen

sıkıştırma oranlarında çalışırlar. Dizel yakıtla çalışan makineler de ise bu oran biraz daha yüksek olup, genellikle 13: 1 oranından biraz daha fazladır.

Kapasitesi düşük olan kojenerasyon tesislerinde gaz türbini, az veya orta derecede güç üreten dahili bir gaz motoru ile değiştirilmelidir. Gaz motorları, dizel motorları ve çift yakıtlı gaz/dizel motorları temel olarak güç ünitelerinde kullanılmaktadır.

Gaz/dizel motorlarının bazı önemli avantajları vardır. Bunlar; yakıt seçiminde esneklik, yüksek maliyet verimliliği ile birlikte oluşan tesis modülerliği ve operasyonel esneklik olarak sıralanabilir. Normal koşullar altında, bu motorlar doğal gazın yanında sabit yanma için çok az miktarda fuel oil ile çalışırlar. Gaz/dizel güç tesislerinin modüler olmasının anlamı bu tesislerin talep olması durumunda ilave parçalarla kolayca daha fazla üretim sağlayan büyük tesislere dönüştürülebilme becerisidir. Operasyonel esneklik çok sayıdaki motor modülü ile sağlanır.

Kojenerasyon uygulamalarında kullanılan dizel motorların gaz türbinlerinden farkı, seri akış oranı, egzoz gazlarının sıcaklığı ve egzoz gazlarının oksijen konsantrasyonudur. Ağır yapılı gaz türbinlerinde egzoz gazlarının sıcaklığı 600°C 'ye kadar ulaşır. Bu değer dizel egzoz gazlarında ancak 360 °C' ye kadar çıkar. Gaz türbinlerinin güç çıktısının kW başına 2.5- 10 kg/s arası seri akış oranı mevcuttur. Gaz türbini egzoz gazları 14.5% ile 15.5 arası oksijen içerir. Bu oran gaz/dizel motorların egzoz gazlarında 13%'e kadar çıkar ki, bu da motorun güç çıktısının kW başına 7 - 7.5 kg/s arasında olmasına neden olur.

Bu motorların atık ısısı üç ayrı derecede geri kazanılabilir. Düşük ısı derecesi yağlama yağı soğutucu sisteminin sıcaklığıdır. Bu sistemde yaklaşık olarak 80°C sıcaklığında su temin edilir. Ceket soğutma suyu ise, yaklaşık 90°C sıcaklıktaki su sağlar . Egzoz/dizel motor egzoz gazları en yüksek sıcaklık değerine sahiptir (yaklaşık 360°C). 3 ısı değiştiricisi , yağlama yağı ısı değiştiricisi (LHE), soğutma suyu ısı değiştiricisi (CHE) ve egzoz gazı ısı değiştiricisi (EHE) , atık ısıyı geri kazanmak için kullanılmalıdır. LHE ve CHE' den çıkan düşük sıcaklıklı atık ısı, düşük basınçlı besleme suyu ısıtıcıları içindeki buharın kısmen değiştirilmesi için uygundur. EHE' den çıkan egzoz gaz ısısı ,besleme suyunun , kazan ekonomizeri içinde ısıtılması için kullanılabilir.

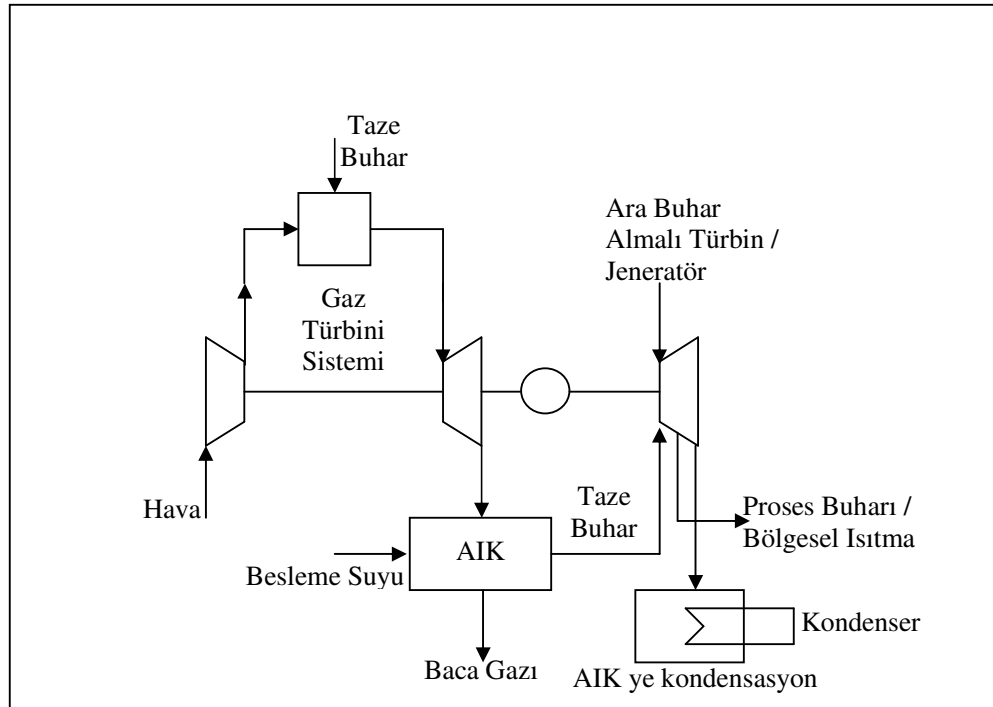
2.5 Kombine Çevrimli Kojenerasyon Tesisleri

Güç üretiminde kullanılan kombine çevrimler, termodinamik olarak hem basit gaz türbinleri çevrimlerinden, hem de buhar türbini çevrimlerinden daha üstündür. Kombine çevrimli

kojenerasyon tesislerinin, hem daha yüksek ortalama ısı toplam sıcaklık değerine sahip olması, hem de daha düşük sıcaklıkta ısıнын ortama atılması, bu tip bileşik kojenerasyon tesislerinin basit çevrimli güç tesislerine oranla, elektriksel verimliliğinin daha fazla olması sonucunu ortaya çıkarır. Bileşik çevrimler, bir de ısı ve güç üretmek için kojenerasyon tesislerinde kullanıldığında bu üstünlük daha da belirgin bir hal alır. Bileşik çevrimli kojenerasyon tesislerinde, toplam enerji kullanım faktörü çoğunlukla %90'a yaklaşır. Bileşik çevrimli kojenerasyon tesisleri genel olarak şu bileşenlerden oluşur:

- Bir gaz türbini
- Bir atık ısı kazanı
- Kondensasyonlu ara buhar almalı veya karşı basınçlı buhar türbini

Kombine çevrimli tesislerin kurulumunda esneklik vardır. Örneğin, ek yanmalı olmayan bir AIK dizaynı seçilebilir. Bölgesel ısıtma suyu, kondensasyonlu buhar türbininden akan buhar tarafından gerekli tedarik sıcaklığına gelene kadar ısıtılır. Hem proses buharının basınç seviyesi hem de elektrik ısı oranı dizayn safhasının önemli parametreleridir. Çünkü proses buharının basıncı direkt olarak buhar türbinine düşen entalpi düşüşünü etkiler. Basınç arttıkça, üretilen elektrik miktarı düşer. Eğer proses buhar basıncı çok yüksek olursa, entalpi farkı çok az olacağından, buhar türbininin kullanılması sorgulanır hale gelir.



Şekil 2.3 Üst konfigürasyonlu bir kombine çevrimli gaz türbinli kojenerasyon tesisinin diyagramında AIK ve alt kısımda bulunan kondensasyonlu buhar türbini.

Bölgesel ısıtmada kullanılan kojenerasyon tesisinin ürettiği ısı, çevredeki hava sıcaklığının fonksiyonu olarak kontrol edilir. Bölgesel ısıtmada kullanılan bileşik çevrimli kojenerasyon tesislerinde, çevredeki hava sıcaklığının, gaz türbini tarafından üretilen güç üzerindeki güçlü etkisi, toplamda olumlu sonuçlara neden olabilir. Çünkü azami ısı talebi, çevredeki en düşük hava sıcaklığına karşılık gelir. Bölgesel ısıtma için gereken tedarik suyun sıcaklığı düşünüldüğünde, bu suyun sıcaklığının, mümkün olduğunca düşük seçilmesi gerekir. Ancak, dizayn aşamasında karar verilen su sıcaklığı seçimi, düşük su tedarik sıcaklığı ile yüksek güç ve yüksek tedarik sıcaklığındaki su ile bölgesel ısıtma taşımalarının düşük maliyeti arasında yapılır. (Horlock, 1997)

Bileşik çevrimli kojenerasyon tesisleri düşük elektrik ısı oranı seviyesi ile özdeşleşen, baskın elektrik gücü durumlarında sıkça kullanılırlar. Kondensasyonlu ara buhar almalı buhar türbini, üretilen gücün artmasını ve karşı basınçlı türbinle karşılaştırıldığında daha fazla dizayn ve çalışma esnekliği sağlar.

Kombine çevrimli kojenerasyon tesisleri için dizayn edilmiş ek yanmasız AIK' ları ise tek basınçlı ve çift basınçlı kombine çevrimi tesislerinde kullanılanlara benzer özelliktedirler. Ancak, tek basınçlı olarak kurulanlarda buhar basıncı yeterince yüksek olmalıdır ki, buhar ve proses buharı basınç seviyesi arasında ki buhar genişlemesi sonucu ortaya çıkan entalpi farkı kabul edilebilir derecede yüksek olsun. Eğer göreceli olarak yüksek proses buhar basıncı seviyesi gerekmekte ise, EYO göreceli olarak düşük olacaktır. Çift basınçlı kombine çevrimi kojenerasyon tesisleri uygulaması EYO değerini artırır. Bu durumda, AIK' nın düşük basınçlı bölümü yalnızca proses buharını üretmek için kullanılır.

3. KOJENERASYON SİSTEMLERİNDE ATIK ISI KAZANIMI

Kojenerasyon yada diğer adı ile Bileşik ısı-güç üretim sistemleri; aynı makinadan elektrik enerjisi ve ısı enerjisi üretmek anlamını taşır. Bileşik ısı güç santralleri; türbinler ve motorlar olarak iki farklı sistemden oluşmaktadır. Bu sistemler ısı ihtiyacı olan tesislerde kullanıldıklarından toplam çevrim verimi %80-90 mertebelerine çıkabilmektedir. Bileşik ısı güç santralleri toplam çevrim verimliliğinin yüksek olması özelliği ile ürettikleri ısı enerjisini kullanmayıp atmosfer ya da deniz gibi doğaya atan santrallerin %30-40'lık verimlerine göre büyük enerji tasarrufu sağlarlar ve ekolojik değerleri korurlar.

Sistemin elektrik şebekesi ile paralel bağlı çalışabilme özelliği bileşik ısı-güç santral sisteminin devre dışı kalması halinde veya santralın kurulu gücünden fazla elektrik enerjisi ihtiyacı doğduğunda şebekeden elektrik enerjisi alınabilir. Tüketim fazlası elektrik enerjisi üretildiğinde ise şebekeye fazlası satılabilir. Özellikle elektrik ile beraber üretilen ısı enerjisinin kullanıldığı göz önünde bulundurulursa şebekeye satılan elektrik enerjisi yakıt maliyetini karşılayabilir. Böylece kullanılan ısı enerjisinin birim fiyatı ucuzlar.

Sanayi kuruluşlarının kendi ihtiyaçları olan elektrik enerjisini kendileri üretmeleri neticesinde ulusal şebekeye olan bağımlılıkları azalacaktır. Sanayiciler şebeke satış fiyatından düşük fiyatlara mal ettikleri elektrik enerjisi ile ürünlerini daha ucuza üretebileceklerdir böylece rekabet güçleri artacaktır. Enerjinin kullanılacağı ünitenin tipine bağlı olarak çeşitli kojenerasyon teknikleri kullanılmaktadır. Bu bölümde bu sistemlerin karakteristik bazı özelliklerinden söz edilecektir.

Bir kojenerasyon sisteminde ısı geri kazanımı, güç üretme sürecinden atılan ısıнын kullanılabilir ısı enerjisine dönüşümünüdür. Bu atık ısıнын kullanımı, yakıcılarda kullanılacak yakıt miktarında azalmaya neden olur. Elektrik üretiminin her ünitesinden geri kazanılabilen kullanılabilir ısı miktarı; kojenerasyonda kullanılan güç üretim sistemine, düzenlemesine ve ihtiyaç duyulan ısı enerjisinin niteliklerine bağlıdır. Bunlar içersinde güç üretim sistemlerinden atılan atık ısıнын niteliğide farklı olduğundan kullanım yerinin ihtiyacı olan ısı enerjisi güç üretim sisteminin belirlenmesinde önemli bir faktördür. Bu bölümde atık ısıнын geri kazanılması anlatılacaktır.

3.1 Gaz Türbinleri Atık Isı Geri Kazanımı

Gaz türbinleri; 2 MW'lık küçük türbinlerde bu oranın %20'sine denk gelecek kadar düşük oranlarda veya 40 MW'lık büyük türbinlerde yine bu oranın %40'ına denk gelecek elektrik

verimlilik oranlarında çalışırlar. Mekanik enerjiye dönüştürülmeyen enerjinin hemen hemen tamamı egzoz gazları ile türbinden atılırlar. Az miktarda ısı da, havalandırma çıkışı ve yağlama yağı sistemi vasıtasıyla atılırlar. 400-550°C'den fazla değerler arasında ki egzoz gazlarının içerisinde ki ısıнын büyük kısmı geri kazanımlıdır. Yüksek sıcaklık değerine sahip egzoz gazları, kaliteli veya sıcaklık ve basınç değeri yüksek, önemli miktarda buharın ve/veya sıcak suyun yeniden kazanımına olanak sağlar.

3.1.1 Egzoz gazlarının direkt kullanımı

Gaz türbinlerinde doğal gaz veya başka katıksız bir yakıt kullanıldığında, egzoz gazları temiz olduğundan çeşitli endüstriyel kurutma uygulamalarında kullanılmaya uygun duruma gelir. Klasik bir türbinde, egzoz gazı ana bileşenlerini yaklaşık olarak; % 1 oranındaki soygazlar, %2-%4 oranındaki CO₂, %6 -%8 oranındaki su buharı, %14 -%16 oranındaki oksijen ve geri kalan miktardaki azot elementleri oluşturur.

3.1.2 Egzoz gazlarının ek yanması

Gaz türbinleri önemli bir miktardaki kullanılmayan fazla hava ile çalışır ve egzoz gazları bol miktarda oksijen içerir . Egzoz gazının % 16 veya daha fazla oksijen içerdiği durumlarda, bu gazlar ek yanma imkanı sağlarlar. Egzoz gazı buharına direkt olarak ilave brülörler yerleştirmek mümkündür. Egzoz gazlarının yüksek sıcaklığı, yakıt verimliliğinin artmasına neden olur ve ek yanma verimliliği de %90'ı geçer. Borulardaki yanma genel olarak doğal gaz ve hafif sıvı yakıtlarla kısıtlıdır.

Boru brülörleri, proses için gereken gazların sıcaklığının artırılması için direkt kurulama uygulamalarında kullanılmaya elverişlidir. Bu koşul türbinden aktarılan sıcaklığın komple bir kurulama uygulaması için yetersiz kaldığı durumlarda oluşur. İlave bir boru brülörü, AIK ile beraber kullanıldığında çeşitli yararlar sağlar.

3.1.3 Atık ısı kazanı

Atık ısı kazanı , proses veya binalardaki enerji gereksinimleri için gerekli buharı elde etmekte türbin egzoz gazlarını kullanan ateşlemesiz kazanlardır. Türbin çıkışının ısısı, genel olarak brülörlü kazanların ısısından daha az olduğu için, AIK' ları daha geniş olmaya meyillidir ve ısı değişim yüzeyi de aynı kapasitedeki brülörlü kazanınkinden daha fazladır. AIK' ları daha fazla buhar üretebilmek için ekonomizerlerle, kızdırıcılarla, tekrar ısıtıcılarla ve boru brülörleriyle donatılabilirler. Bunun yanında, türbin kapasite kayıplarını azaltmak için egzoz

borusu/AIK sistemlerinin basıncı minimize edilmelidir.

AIK' da üretilen buhar miktarı, AIK' nın gaz-buhar ısı profiline göre belirlenir. Isı geri kazanım limitleri AIK çıkış bacasının sıcaklık kapasitesiyle sınırlıdır ki bu genelde 150°C veya daha fazlası bir değere karşılık gelir. Buna rağmen, bazı uygulama ve yakıtlarda 120°C' lik bir sıcaklık da yeterli olmaktadır. Baca çıkış sıcaklığı yoğunlaşmayı ve bacada oluşması muhtemel asitlenmeyi engelleyecek şekilde belirlenir. Gaz türbini kısmi yük operasyonu, düşük türbin çıkış ısısıyla ve AIK' dan atılan düşük sıcaklıktaki egzoz gazlarıyla sonuçlanır.

Eğer AIK bir ekonomizer içermiyorsa, baca ısısı, buharın doyma sıcaklığı ile sınırlı olur. Ancak, bir ekonomizerin kullanılması durumunda bile, yüksek sıcaklık ve basınçlı buhar çıkış koşulları 200°C veya daha yüksek baca çıkış sıcaklık derecesiyle neticelenebilir. Böylece kullanılan geri kazanılabilir ısı miktarı düşer. Bu durumda, çok basınçlı kazanlar ekonomik olabilir. Çünkü bu kazanlar baca sıcaklığının 150°C'a düşmesine yardımcı olur ve bununda sonucunda ısı geri kazanımı artar.

AIK tarafından üretilen buhar, kazan besleme suyunun ön ısıtması için kullanılabilir ve burada kullanılan buhar, üretimde kullanılabilecek toplam buhar miktarının belirlenmesi için AIK çıktısından çıkarılmalıdır. Kojenerasyon ekonomilerini değerlendirirken, konvansiyonel sistemin ürettiği buhar ile kojenerasyon sisteminin ürettiği buhar ölçüleri arasında tutarlılık göstermek önemlidir.(Orlando, 1999)

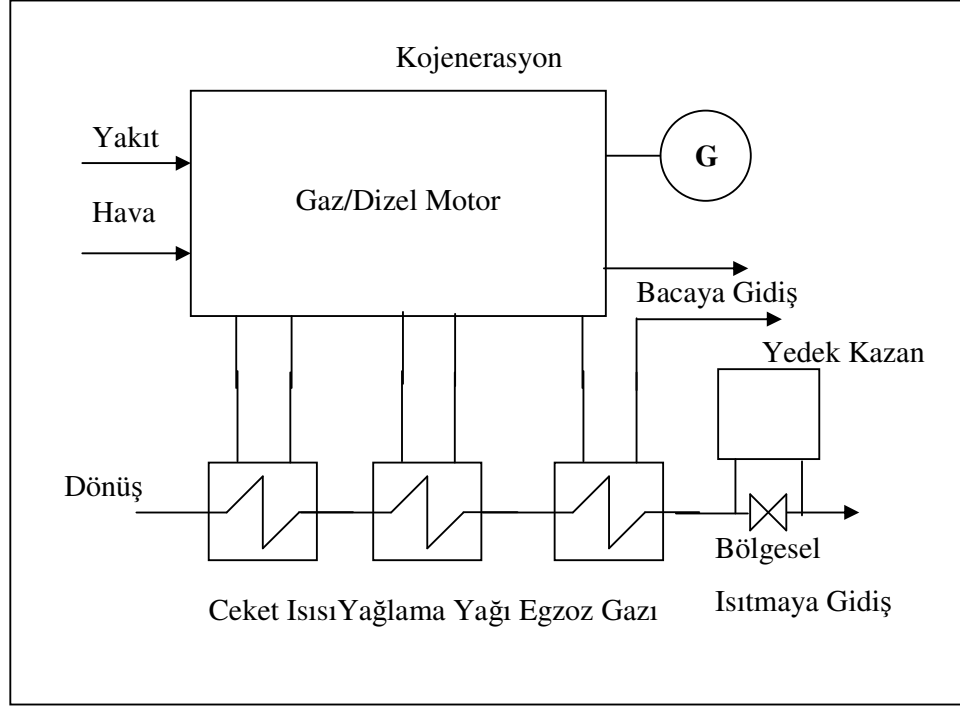
3.2 Pistonlu Motor Isı Geri Kazanımı

Gaz türbinlerinin tersine, motorlarda ceket soğutma suyu ve egzoz gazları gibi iki atık ısı kaynağı vardır. Isı geri kazanımının en önemli görevi aşırı ısınmayı önlemek için motordan ısının atılmasıdır. Tüm ısı geri kazanım sistem dizayn kararları motor setinin emniyetli bir şekilde çalışması amacıyla yapılmalıdır.

3.2.1 Egzoz gazı ısı geri kazanımı

Motor egzoz gazları 370°C ile 540°C arasında değişen sıcaklık değerlerine sahiptirler ve bu gazlar sıcak su veya düşük/yüksek basınçlı buhar üretmek için geri kazanılabilir. Egzoz gaz sıcaklığı, motor tipine ve yüklemeye bağlı olarak farklılık gösterir. İki zamanlı motorlar, dört zamanlı motorlarla kıyaslandığında daha düşük sıcaklıkta yoğun egzoz gazı üretirler. Kısmi yük operasyonu, düşük sıcaklıktaki egzoz gazlarıyla sonuçlanır. Egzoz manifoldunun su soğutması da egzoz sıcaklığını düşürür.

Kojenerasyon sistemlerinde kullanılan motorlar daha küçüktürler, bu yüzden egzoz gazı ısı değıştiricileri de küçüktür. Egzoz boruları, makina dairesinin gereğinden fazla ısıya maruz kalmaması için ve çalışanların korunması için izole edilmelidir. Egzoz sistemlerinde sert dönemeçlerden sakınılmalıdır. çünkü sert dönemeçler gereğinden fazla art basınca neden olurlar.



Şekil 3.1 Gaz/Dizel motorlu kojenerasyon tesisi şeması

3.2.2 Ceket ısısı geri kazanımı

Bir motora giren enerjinin yaklaşık üçte biri ceket soğutma sistemi tarafından atılır. Bu ısının hemen hemen tamamı geri kazanılabilir niteliktedir. Termal enerji saha gereksinimleri ve dizayn tercihlerine bağlı olarak ya 127°C'ye varan sıcak su olarak ya da azami 103 kPa'lık düşük basınçlı buhar olarak geri kazanılabilir.

3.2.3 Yağlama yağ/aftercooler ısı geri kazanımı

Pistonlu motora giren enerjinin %10'a kadar olan kısmı yağlama yağı ile atılır. Yüksek kaliteli yağlama yağları genel olarak 70°C ile 95°C arasında kayba uğramadan çalışır. Çalışma ısısı düştükçe, yağın ömrü uzar. Ancak geri kazanılabilir ısı kullanılabilirliğini kaybeder. Buna ek olarak, yağ sıcaklığının çok düşük olması halinde su yoğunlaşabilir. Yüksek sıcaklıktaki

yağlama yağları, yağın ömrünü düşürür, ancak geri kazanılabilir ısının miktarını ve kalitesini artırır. Yağ sıcaklığı aynı zamanda bazı parçaların ve yüzey sıcaklığını belirleyen ceket soğutucusunun sıcaklığından da etkilenir.

4. OPTİMİZASYON YÖNTEMLERİ

Kojenerasyon Santralinin bir organize sanayii bölgesindeki optimum dağıtım güzergahının bulunması ve bu güzergah içinde yine optimum yerleşim noktasının belirlenmesi için gerekli olan teknikler için farklı kaynaklar karşılaştırılarak yararlanılmış olmasının yanında asıl kaynak olarak YTÜ Fen-Edebiyat Fakültesi Matematik Bölümü yayınlarından Kantitatif Karar Verme Teknikleri (Doç. Dr. Mehmet Ahlatçioğlu, Y.Doç.Dr. Fatma Tiryaki, 1998) kitabından yararlanılmıştır.

4.1 Network (Şebeke) Analizleri

Birbirlerine paralel veya seri bağlı elemanlardan oluşan sistemlerden en verimli biçimde yararlanabilmek için network analizleri olarak isimlendirilen teknikler geliştirilmiştir. Bilim alanına yeni girmelerine rağmen geniş bir uygulama alanı bulmuşlardır.

Bunlardan bazıları elektrik, su şebekeleri, doğal gaz dağıtımı, petrol boru hatları, kan dolaşımı, sinir sistemi, bilgisayar devre tasarım mimarisi gibi sistemlerde kapasite ve maksimum akış problemleri, taşıma, dağıtım, aktarma, depolama, aktarma, yayılma, tesis yerleşimi gibi minimum yol-fiyat problemleri olarak sayılabilir.

4.1.1 Temel Tanımlar ve Kavramlar

Modellerle ve çözüm metotları ile ilgilenmeden önce bazı network analizleri için gerekli genel tanım ve kavramları aşağıda özet olarak verelim.

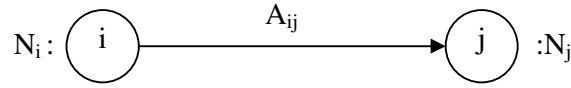
Network: Noktalar (düğümler) kümesi ve bu noktaları birleştiren arkların dizilişidir.

Nokta (Düğüm) : (node, vertice) Network'deki arz, talep ya da aktarma merkezidir. Nokta (düğüm) belirli bir yere transfer edilen, veya depolanan alanları veya bunların geçiş noktalarını ifade eder. i . nokta N_i ile gösterilecektir. Bir network'de başlangıç noktası (N_s), aktarma noktası, bitiş noktası (N_t) olmak olmak üzere üç ayrı nokta tipi vardır.

Nokta ve Ark herhangi bir (network) şebekenin iki temel yapı taşıdır.

Ark: (branche, edge, link, arc) Network'de herhangi iki nokta arasındaki yoldur. Gidiş yönü belirli olan arklara yönlü ark, belirsiz olanlara yönsüz ark denir. Bir yönsüz ark iki yönlü ark çifti gibi düşünülebilir. Biz burada yönlü arkları oklar ile, yönsüz arkları doğru parçaları ile göstereceğiz.

N_i den N_j ye giden ark A_{ij} ile gösterilecektir. Ark yönsüz ise veya çift yönlü ise $A_{ij}=A_{ji}$ alınabilir.



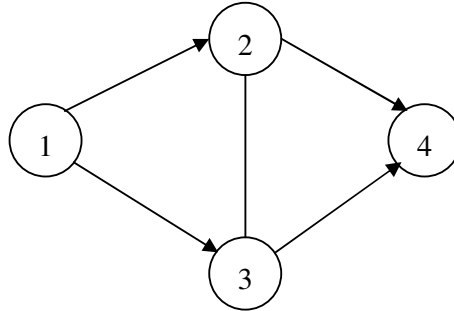
Şekil 4.1 N_i den N_j ye giden A_{ij} Arkı



Şekil 4.2 Yönlü ve yönsüz (Çift yönlüye eşdeğer) arklara örnek

Şekil 4.2 'de çift yönlü veya yönsüz ark görülmektedir ve burada $A_{ij}=A_{ji}$ olmaktadır.

Ark ve nokta sayısı sonlu olan network' e sonlu network denir. Tüm çalışmalarımızda sonlu network'ler incelenecektir.

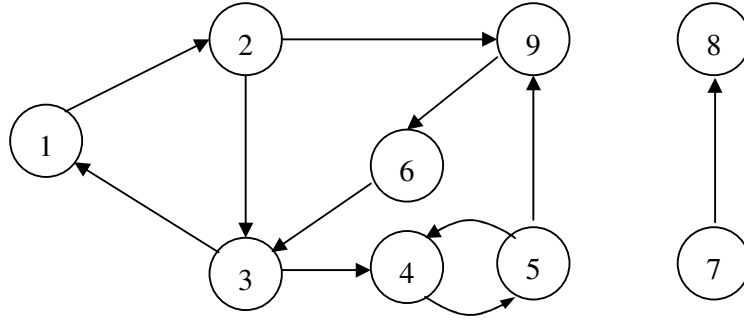


Şekil 4.3 Bağlantılı network örneği

Şekil 4.3 de 4 nokta ve 5 ark'a sahip bir network görülmektedir. Buradaki 4 ark yönlü olduğu halde $A_{23}=A_{32}$ arkı yönsüzdür.

Bir network de, noktaların herhangi bir alt kümesi Y ve bunun network' deki noktalara göre tümleyeni $\hat{Y}$ olsun. $N_i \in Y$ ve $N_j \in \hat{Y}$ olacak şekilde en az bir A_{ij} veya A_{ji} arkı varsa "network bağlantılıdır" denir.

Şekil 4.3 bağlantılı, Şekil 4.4 bağlantısız network'e birer örnektir.



Şekil 4.4 Bağlantısız network örneği

Zincir: İki özel noktayı birleştiren nokta ve arkların dizilişi bir zincirdir.

$N_i, A_{12}, N_2, A_{23}, \dots, N_{k-1}, A_{k-1,k}, N_k$ nokta ve arkların dizilişi N_1 i N_k ya birleştiren bir zincirdir.

Şekil 4.3 de $N_1, A_{12}, N_2, A_{24}, N_4, A_{43}, N_3$ bir zincirdir.

Şekil 4.4 de ise $N_1, A_{12}, N_2, A_{23}, N_3, A_{34}, N_4, A_{45}, N_5, A_{54}, N_4$ bir zincirdir.

Devre : Eğer zincirde $N_1=N_k$ ise zincir devre adını alır.

Şekil 4.3’de $N_1, A_{12}, N_2, A_{23}, N_3, A_{31}, N_1$ bir devredir. Hiçbir devre içermeyen zincire basit zincir denir.

Yol: Üzerindeki bütün arkları yönlü olan zincirlere yol denir.

Şekil 4.3 de $N_1, A_{12}, N_2, A_{23}, N_3, A_{34}, N_4$ zinciri bir yoldur. $N_1, A_{12}, N_2, A_{23}, N_3, A_{36}, N_6$ zinciri bir yol değildir.

Her yol bir zincir olduğu halde her zincir bir yol değildir.

Ağaç: Yönsüz, bağlantılı ve devre içermeyen bir network’dür. n noktalı bir yapının,

- Bağlantılı olması,
- Devresi olmaması
- Arkların sayısının $n-1$ olması

Şartlarından iki tanesini aynı anda gerçekleştirmesi durumunda ağaç olarak kabul edilir.

Geren Ağaç: Bir network’ün Ağaç olan alt network’üdür.

4.2 Maksimum Akış

"Su, petrol ve doğal gaz boru hatları, elektrik şebekesi, yol gibi sistemlerde yapılacak akışın maksimum miktarı nedir? Hangi arklardan ne miktar akış yapılmalıdır? Hangi arklarda atıl (boş) kapasite vardır? Hangi arklar sistem için darboğaz oluşturmaktadır?" şeklindeki sorular bu başlık altında yer almaktadır.

Maksimum akış için düzenlenmiş bir network'ün başlangıç noktasına **kaynak** (N_s), bitiş noktasına **kuyu** (N_t) denir.

Network'de her A_{ij} arkına b_{ij} ile gösterilen bir ark kapasitesi karşılık gelir. A_{ij} arkında yapılabilecek akış miktarı X_{ij} tamsayı değişkenleriyle gösterilirse,

$$\sum_i x_{ij} - \sum_k x_{jk} = \begin{cases} -v & , j = s \text{ ise} \\ 0 & , j \neq s, t \text{ ise} \\ v & , j = t \text{ ise} \end{cases} \quad (4.1)$$

$$0 \leq x_{ij} \leq b_{ij} \quad , \quad \forall i, j \text{ için} \quad (4.2)$$

özellikleri yazılabilir. Burada ; v : akış miktarıdır. (4.1) denklemi akışın noktalardaki korunumunu verir. Yani, kaynaktan v miktar akış, hiç giriş olmadığı halde, çıkar. Ara noktalara giren akış, çıkan akışa eşittir. Kuyuya ise v miktar akış ulaşır (kuyudan çıkış yoktur). (4.2) ise, arklarda yapılabilecek akışın, ark kapasitesi ile sınırlı olması gereğini vurgular.

$$v = \sum_j x_{sj} \quad (4.3)$$

amaç fonksiyonunu (4.1)-(4.2) kısıtları üzerinde maksimize eden Lineer Programlama (LP) probleminin çözümüyle elde edilebilir.

Burada problemin özel yapısı göz önüne alınarak geliştirilmiş olan algoritmalar verilecektir.

N_1 kaynak ve N_k kuyu olmak üzere bir $N_1, A_{12}, N_2, A_{23}, \dots, N_k$ yolundaki akışın maksimum değeri, yoldaki ark kapasitelerinin minimumuna eşittir. Keyfi bir network için bu durumu genelleştirelim. Y network'deki noktaların bir alt kümesi, $\hat{Y}$ de onun tümleyeni olmak üzere bir $(Y, \hat{Y})$ kesiti; $N_i \in Y$ ve $N_j \in \hat{Y}$ veya $N_j \in \hat{Y}, N_i \in \hat{Y}$ den biri olan A_{ij} , arklarının kümesi olarak tanımlanmıştır.

$N_s \in Y$ ve $N_t \in \hat{Y}$ olmak üzere $(Y, \hat{Y})$ kesitindeki arkların toplam kapasitesi $C(Y, \hat{Y})$ ile gösterilir ve kesit kapasitesi olarak adlandırılır.

Yönsüz arklarda $C(Y, \hat{Y}) = C(\hat{Y}, Y)$ olmasına karşın, genelde yönlüler için $C(Y, \hat{Y}) \neq C(\hat{Y}, Y)$ olmaktadır.

(4.1)-(4.2) kısıtları altında maksimum akış değeri daima N_s , ve N_t yi ayıran herhangi kesit kapasitesinden küçük veya eşittir.

N_s , ve N_t yi ayıran minimum kapasiteli kesite minimum kesit denir.

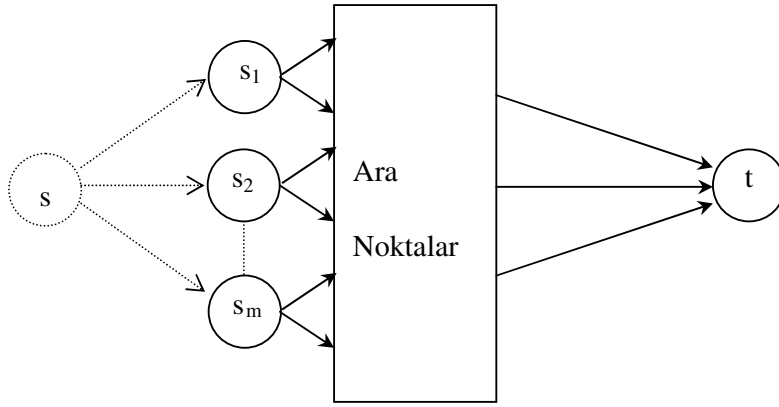
4.3 Çok Terminalli Maksimal Akışlar

Şimdiye kadar incelediğimiz network'de, bir kaynak ve bir kuyu arasındaki maksimum akışı bulduk. Kaynak veya kuyu sayısının birden fazla olması halini burada inceleyeceğiz

4.3.1 Çok Kaynaklı Maksimal Akış

Kaynağın (başlangıç noktasının) birden fazla olması halinde kaynaklardan kuyuya yapılabilecek maksimum akışı bulmak isteyelim.

Network'de $N_{s1}, N_{s2}, \dots, N_{sm}$ gibi m tane kaynak noktası olduğunu kabul edelim. Network'ün dışında bir yapay N_s kaynak noktası seçilip, N_s den N_{si} ye $b_{s,si} = \infty$ kapasiteli $A_{s,si}$, yönlü arkları network'e katılırsa, gerçek kaynaklar network'de ara nokta rolünü oynarlar. Böylece problem; bir kaynak ile bir kuyu arasındaki maksimum akışı bulma problemine indirgenmiş olur (Şekil 4.5).

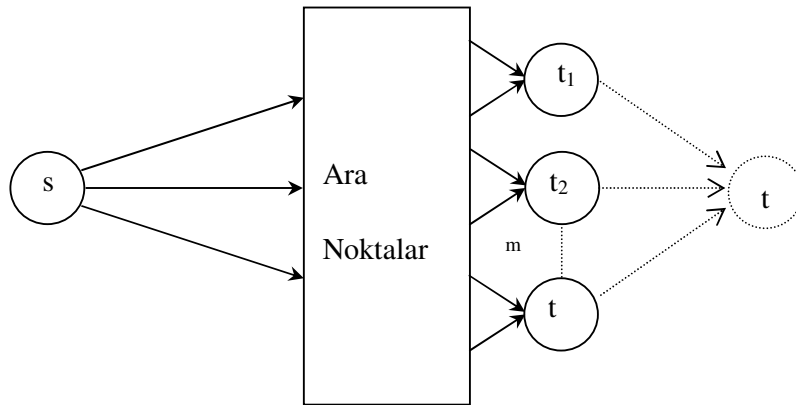


Şekil 4.5 Çok kaynaklı maksimal akış için örnek

4.3.2 Çok Kuyulu Maksimal Akış

Network'de kuyu sayısının birden fazla olması halidir. Aynen çok kaynaklı modelde olduğu gibi, kuyular sonsuz kapasiteli yönlü arklarla yapay bir kuyuya bağlanır. Bu durumda, gerçek kuyular birer ara nokta konumundadır. Tek kaynak ve tek kuyu arasındaki maksimal akışı bulmakla, tek kaynak ve çok kuyu arasındaki maksimal akışı da bulmuş oluruz.

n kuyulu, tek kaynaklı bir model Şekil 4.6 da olduğu gibi tek kaynak tek kuyu yapısında bir probleme dönüştürülebilir.



Şekil 4.6 Çok kuyulu maksimal akış için örnek

Çok kaynaklı - çok kuyulu network'de maksimal akışın, 4.3.1 ve 4.3.1 nin birleşimiyle elde edilebileceği belirgin bir şekilde görülebilmektedir.

4.4 Network'de Kaynak Noktasının Belirlenmesi

Bir bölgede kurulmuş su, elektrik, doğal gaz gibi bir dağıtım şebekesini göz önüne alalım. Bağlantı noktaları ve bu noktalar arası ark kapasiteleri belirlenmiştir.

Soru : Şebekeden maksimum ölçüde yararlanmak (kaynaktan diğer noktalara yapılabilecek akışlar toplamının maksimum olması veya kullanılamayan -aylak- kapasitelerin minimum olması) için kaynağı hangi bağlantı noktasına yerleştirmeliyiz?

Bu bölümde, network' deki bütün nokta çiftleri arasındaki maksimum akışı bulmaya çalışacağız. Yani, herhangi iki noktadan birini kaynak diğerini kuyu kabul edip diğer bütün noktalar ara nokta konumunda olduğunda, kaynaktan kuyuya yapılabilecek maksimum akış miktarını bulmak istiyoruz.

Uygulama alanları da göz önüne alındığında, bu tip problemler genelde yönsüz network'lerde ortaya çıkar. Bundan dolayı sadece yönsüz network'ü inceleyeceğiz.

N_i ile N_j arasındaki maksimal akış değeri $f_{ij} = f_{ji}$ olacaktır. Bütün noktalar için $f_{ii} = \infty$ alacağız.

Teorem 4.4 : $f_{ik} = f_{ki}$ negatif olmayan sayılar kümesinin bir network'deki maksimal akış değerlerini gösterebilmeleri için gerek ve yeter şart

$$f_{ik} \geq \min (f_{ij}, f_{jk}) , (\forall i,j,k \text{ için }) \quad (4.4)$$

ün sağlanmasıdır.

İspat: Gereklilik: Kaynak ve kuyu olarak N_i ve N_k noktalarını seçelim. Maksimum akış - minimum kesit teoreminden

$$f_{ik} = C(Y, \hat{Y}) \quad (4.5)$$

bağıntısına sahibiz. Burada $N_i \in Y$ ve $N_k \in \hat{Y}$ dir. Şimdi Y veya $\hat{Y}$ den herhangi birisine ait olan N_j noktasını alalım.

Eğer $N_j \in Y$ ise $(Y, \hat{Y})$ minimum kesiti N_j ile N_k yı ayırır. Böylece,

$$f_{jk} \leq C(Y, \hat{Y}) = f_{ik} \quad (4.6)$$

olmaktadır.

Eğer $N_j \in \hat{Y}$ ise $(Y, \hat{Y})$ minimum kesiti N_i yi N_j den ayırır. Böylece,

$$f_{ij} \leq C(Y, \hat{Y}) = f_{ik} \quad (4.7)$$

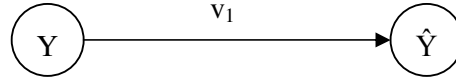
olmaktadır. (4.6) ve (4.7) den; aynı anda sade birisi geçerli olduğundan

$$\min(f_{ij}, f_{jk}) \leq f_{ik}$$

bağıntısı. elde edilir.

Yeterlilik: (4.4) bağıntısını gerçekleştiren f_{ik} lar network'de birer maksimal akış değeridirler.

Network'ün analizi : Önce iki terminal nokta seçip bunlar arasında orijinal network' de maksimum akış hesaplanır. Bu hesapta, minimum kesit $(Y, \hat{Y})$ olsun. Sembolik olarak bir doğruya bağlanmış iki çember (yuvar veya daire) ile gösterilir.



Şekil 4.7 Network analizi için örnek

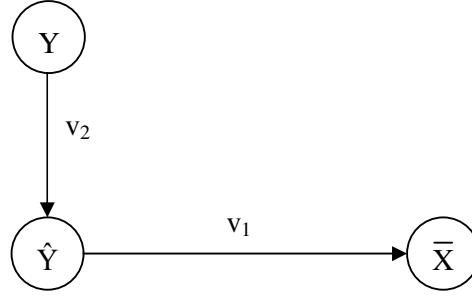
Ayrıca ;

$$v_1 = C(Y, \hat{Y})$$

değeridir. Y nin noktaları bir çember, $\hat{Y}$ nin noktaları da diğer çember içinde gösterilmiştir.

İkinci olarak Y veya $\hat{Y}$ nin birisinden iki terminal nokta seçip maksimum akış hesaplanır.

İki terminal noktayı da Y den seçtiğimizi varsayalım. $\hat{Y}$ tek bir noktaya yığılmıştır. Y deki iki terminal nokta arasında ikinci bir minimum kesit elde edilir. Yeni durum;



Şekil 4.8 Yeni durumun genel gösterimi

Şekliyle gösterilebilir. Burada $v_2 = C(Y, \hat{Y})$ dir.

Eğer $\hat{Y}$, v_2 değerli minimum kesitin $\hat{Y}$ tarafında ise $\bar{X}$, $\hat{Y}$ ye ; Y tarafında ise $\bar{X}$, Y ye bağlanır.

Bir yuvar bölme işlemi devamlıdır. Her yuvar tek bir noktadan meydana gelene kadar işleme devam edilir.

4.5 En Kısa Yol ve Minimal Yayılma Algoritmaları

En kısa yollar, Network teorisinin temel problemlerinden birisidir. Başlangıç noktasından herhangi bir noktaya olan en kısa yol bulunmaya çalışılır.

Network'ün her A_{ij} arkına negatif olmayan bir d_{ij} uzunluğu karşılık gelmektedir.

Eğer noktalar şehirleri, d_{ij} ler de i şehrinden j şehrine taşıma ücretlerini gösterecek olursa, en kısa yol problemi en ucuz yol problemine dönüşmüş olur.

Eğer nokta çiftleri arkla bağlantılı değilse $d_{ij} = \infty$ alınacaktır. Genelde uzaklıklar simetrik olmak zorunda değildir. Yani, $d_{ij} = d_{ji}$ eşitliği genelde geçerli değildir. Ayrıca uzunluklar keyfidir ve üçgen eşitsizliği $d_{ij} + d_{ji} \geq d_{ik}$ yı sağlamak zorunluluğu yoktur.

N_s den (başlangıç noktasından) N_t ye (bitiş noktasına) en kısa yolu bulmak için, N_s den network' deki diğer bütün N_i noktalarına olan en kısa yollar bulunur. N_s den N_i ye sadece bir en kısa yol kalacak şekilde, en kısa yol üzerinde olmayan arklar atılır. Eğer N_s ile N_i arasında birden fazla en kısa yol varsa, sadece bir tanesi kalacak şekilde, gereksiz arklar atılır. Bütün elemelerin sonucunda bir ağaç elde edilir.

n noktalı bir grafi geren ve n - 1 dalı olan bu ağaç en kısa yollardan oluşmuştur.

Network' de N_s den diğer bütün noktalara en kısa yolları içeren ağacı bulmak isteyelim.

Ağaç üzerindeki arkları ağaç arkları, ağaç üzerinde olmayan arkları da diğer arklar olarak isimlendireceğiz.

Başlangıçta bütün arklar diğer ark konumundadır. Algoritma N_s den başlar ve sıfırdan $n-1$ e kadar ağaç arklarının sayısını artırmaya çalışır.

Network' ün N_j noktaları (f'_j, i) veya (f_j, i) şeklinde etiketler alır.

Bunlardan birincisine geçici (değişken) etiket, ikincisine daimi (sabit) etiket denir. N_s den N_j ye giden herhangi bir yolun uzaklığı f'_j ile, en kısa yolun uzaklığı da f_j ile gösterilir. i ise yol üzerinde olup, N_j den bir önceki N_i noktasının indisidir.

Başlangıçta, $f_s = 0$ ve N_s den N_i ye giden yolda birden fazla diğer ark varsa $f'_j =$ alınacaktır.

N_s ye komşu noktalar N_k lar olsun.

$f'_j = f_s + d_{sk}$ olmak üzere N_k noktaları (f'_k, s) geçici etiketlerini alırlar. Bunlardan, $\min_k f'_k = f_r$ ye karşılık N_r noktası, (f_r, s) daimi etiketini alır ve A_{sr} arkı ağaca dahil edilir.

Ağacın son etiketlenmiş noktası N_r ve N_r ye komşu ağaç dışı noktalar N_j ler olsun.

N_j ler için;

$$f'_j := \min (f'_j + f_r + d_{rj})$$

ler hesaplanır. Burada kullanılan $:$ = işareti yerine al anlamındadır.

$\min_j f'_j = f_p$ ye karşılık N_p noktası sabit etiketi alır.

İşlem, bütün noktalar sabit etiket alana kadar, yani $n-1$ ağaç arkı bulunana kadar devam eder.

Teorem 5.7 : N_s den N_t ye en kısa yol uzunluğu f_t dir.

İspat : N_s den N_t ye herhangi bir yol: $N_s, A_{s1}, N_1, A_{12}, \dots, N_p, A_{pt}, N_t$ olsun. Bu yolun uzunluğu $d_{s1} + d_{12} + \dots + d_{pt}$ olur.

Diğer yandan, her A_{kj} arki için,

$$f := \min (f_j, f_k + d_{kj}) \text{ den,}$$

$$f_j \leq f_k + d_{kj} \text{ veya } f_j - f_k \leq d_{kj} \text{ dir.}$$

$$\text{Yol boyunca; } f_1 - f_s \leq d_{s1}$$

$$f_2 - f_s \leq d_{12}$$

$$\vdots \quad \vdots \quad \vdots$$

$$f_t - f_p \leq d_{pt}$$

eşitsizliklerini taraf tarafa toplarsak,

$$f_t - f_s \leq d_{s1} + d_{12} + \dots + d_{pt}$$

elde edilir. $f_s = 0$ olduğu da hatırlanarak,

$$f_t \leq d_{s1} + d_{12} + \dots + d_{pt}$$

bulunur. Görüldüğü gibi f_t , herhangi bir yol uzunluğundan büyük olamaz. Şu halde en kısa yol uzunluğu f_t dir.

4.6 İşaretten Bağımsız Arkılarla En Kısa Yol:

Network'deki arkların uzunluğu pozitif, negatif işaret alabileceği gibi sıfır da olabilir.

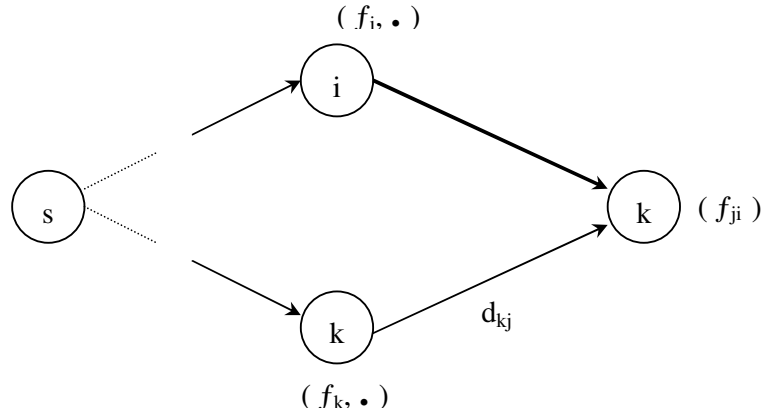
En kısa yol algoritması N_s den başlar. Noktalar, mümkün olduğu kadar, kısa yollar ile bağlanarak bir ağaç oluşturulur.

Ağaçta her N_j noktası ($f_{j,i}$) gibi etiket alır. Burada f_j , N_j nin N_s e ağaç üzerindeki uzaklığını, i de ağaçta N_j den bir önceki noktanın (N_i nin) indisini göstermektedir.

Network' ün ağaç üzerinde olmayan bazı arkları ile ağaçta bulunan arkları arasında devreler

oluşabilir.

Örneğin;



Şekil 4.9 İşaretten bağımsız arklarla en kısa yol için örnek

Devresini göz önüne alalım. $N_i(f_i, \bullet)$, $N_k(f_k, \bullet)$ etiketleri almıştır. A_{ij} arkı ağaç üzerindedir. Fakat d_{kj} uzunluğundaki A_{kj} arkı ağaç üzerinde değildir.

Amacımız N_j ye en kısa yoldan gelmek olduğuna göre, bu iki yoldan kısa olanını tercih ederiz. Yani;

$$f_j := \min(f_j, f_k + d_k) \text{ olur.}$$

- a) $f_j \leq f_k + d_k$ ise A_{ij} dalı ağaçta kalır ve N_j nin etiketi değişmez.
- b) $f_j > f_k + d_k$ ise A_{ij} dalı ağaçtan çıkarılır ve yerine A_{kj} konur. Bu durumda N_j nin etiketi (f_j, f_k) olur.

Bu işlemler bütün noktaların etiketleri değişmez damgasını alıncaya kadar devam eder. En kısa yol olması için network'de negatif devre olmamalıdır.

4.7 Minimal Yayılma Problemleri

Yünsüz arklar ile bağlanmış bir network'ü göz önüne alalım. Network'ü geren ve dalların uzunlukları toplamı minimum olan ağacı bulmak istiyoruz.

Ark uzunlukları negatif olmayacaktır. Ayrıca, yönsüz olduğundan, bütün arklar için $d_{ij} = d_{ji}$ dir.

Network'de başlangıç noktası keyfi olarak seçilir. Seçilen bu başlangıç noktası ağacın ilk elemanıdır.

Ağacın noktalar kümesi Y ve network'ün ağaç dışındaki noktalar kümesi $\hat{Y}$ olsun.

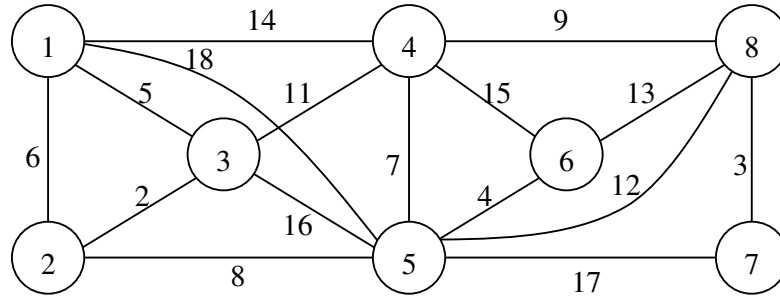
Her adımda, $N_i \in Y$ ve $N_j \in \hat{Y}$ için, $\min d_{ij} = d_{pr}$ uzunluğunda A_{pr} arkı ağaca dahil edilir.

Yeni durumda,

$$\hat{Y} = Y \cup \{N_r\} \quad \text{ve} \quad \hat{Y} = \hat{Y} \setminus \{N_r\}$$

Olur. Bu işlem $\hat{Y} = \emptyset$ oluncaya kadar devam eder. Son durumda bulunan ağaç minimal yayılmayı sağlar.

Örnek: Sekiz yerleşim birimini birbirine bağlayacak yollar yapılmak istenmektedir. Birimler arası yapılabilecek yollar ve uzunlukları aşağıdaki network ile verilmiştir. Birimler arasında bağlantıyı sağlayan minimum yol uzunluğu nedir?



Şekil 4.10 Sekiz yerleşim birimi için örnek network

Çözüm: Başlangıç noktasını N_5 seçelim.

$Y = \{N_5\}$ ve $\hat{Y} = \{N_1, N_2, N_3, N_4, N_6, N_7, N_8\}$ dir.

N_5 e bağlı en kısa A_{56} arkı ağaca dahil edilir. Burada,

$Y = \{N_5, N_6\}$ ve $\hat{Y} = \{N_1, N_2, N_3, N_4, N_7, N_8\}$

Olmuştur. Y ye bağlantılı ve ağaç dışındaki arkların en küçüğü A_{54} ağaca katılır. Yeni durumda,

$Y = \{N_5, N_6, N_4\}$ ve $\hat{Y} = \{N_1, N_2, N_3, N_7, N_8\}$

Olur. Y ye bağlantılı ve ağaç dışındaki arkların en küçüğü A_{52} ağaca katılır. Buna göre,

$$Y=\{N_5, N_6, N_4, N_2\} \text{ ve } \hat{Y}=\{N_1, N_3, N_7, N_8\}$$

olur. Y ye bağlantılı ve ağaç dışındaki arkların en küçüğü A_{23} ağaca katılır. Yeni durumda,

$$Y=\{N_5, N_6, N_4, N_2, N_3\} \text{ ve } \hat{Y}=\{N_1, N_7, N_8\}$$

olur. Ağaca bağlanabilecek en küçük ark A_{31} de ağaca dahil edilir. Yeni durumda,

$$Y=\{N_5, N_6, N_4, N_2, N_3, N_1\} \text{ ve } \hat{Y}=\{N_7, N_8\}$$

olur. Aynı şekilde devam ederek A_{48} de ağaca dahil edilir. Yeni durumda,

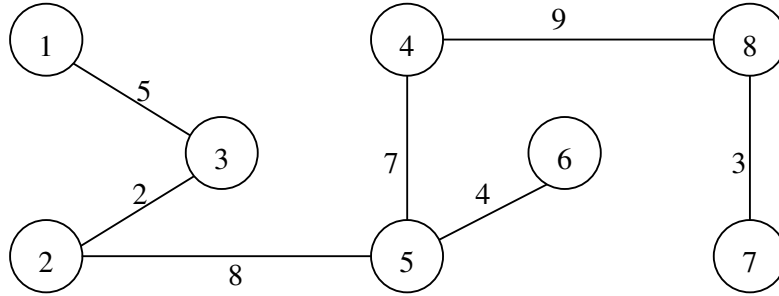
$$Y=\{N_5, N_6, N_4, N_2, N_3, N_1, N_8\} \text{ ve } \hat{Y}=\{N_7\}$$

olur ve mevcut ağaca bağlanabilecek en küçük ark A_{87} de ağaca dahil edilir. Şimdi,

$$Y=\{N_5, N_6, N_4, N_2, N_3, N_1, N_8, N_7\} \text{ ve } \hat{Y}=\emptyset$$

olmuştur.

$\hat{Y}=\emptyset$ şartı sağlandığından algoritma son bulmuştur. Network'ün noktaları belirlenen arklarla bağlandığında aranan minimal yayılmış ağaç elde edilmiş olur.



Şekil 4.11 Sekiz yerleşim birimi için en kısa yayılmayı veren sonuç ağaç

4.8 Minimum Potansiyel Farkı:

Elektrik, Akışkanlar ve Mekanik'in en önemli kavramlarından birisi de potansiyel' dir. Bu kavram, Uygulamalı Matematik'in birçok uygulama alanına girmiştir.

Network' de potansiyeli tanımlayalım. Her N_j noktasına potansiyel adı verilen ve f_j ile gösterilen bir reel sayı, A_{ij} arkına ise $x_{ij} = f_j - f_i$ ile gösterilen bir potansiyel farkı karşılık gelir.

$N_1, A_{12}, N_2, A_{23}, \dots, N_P$ Yolundaki potansiyel farkı :

$$x_{12} + x_{23} + \dots + x_{p-1, p} = f_p - f_1$$

olur. Bir devredeki potansiyel farkının sıfır olacağı aşıkardır.

Bir network'de minimum potansiyel farkı problemi aşağıdaki gibi kurulur.

Her A_{ij} arkındaki potansiyel farkına,

$$f_j - f_i \leq c_{ij}$$

kısıtını sağlayan bir c_{ij} sabit sayısı karşılık gelir.

“Başlangıç noktası (N_s) ile bitiş noktası (N_t) arasındaki $f_t - f_s$ potansiyel farkının, verilen kısıtlar altında, minimum olması için akım hangi yoldan yapılmalıdır?” sorusunu cevaplayacağız. Burada potansiyel ile değil potansiyel farkı ile ilgileneceğiz. Başlangıç noktasında bir potansiyel kaybı olmadığından $f_s = 0$ alınabilir. Problem, yapısı gereği, *İşaretten Bağımsız Arklar ile En Kısa Yol Algoritması* kullanılarak çözülecektir.

Genel uygulama alanlarında, arklardaki potansiyel farklarına üstten sınır getirilebileceği gibi alttan da sınır getirilebilir. Yani, bütün A_{ij} arkları için,

$$b_{ij} \leq f_j - f_i \leq c_{ij}$$

kısıtları yazılabilir. Bu kısıtlar

$$f_j - f_i \leq c_{ij}$$

$$f_i - f_j \leq -b_{ij}$$

yapısında iki ayrı kısıta ayrıştırılır.

5. BUHAR DAĞITIM HATLARININ TASARIM ESASLARI

Bu bölümde santralden çıkan buharın, müşterilere belirli bir basınç kaybı limitinde ulaşması için buhar dağıtım hat çaplarının hesaplanmaları, ısı genleşmelerden dolayı doğacak yüklerin hesaplanma teknikleri, her bir çap için gereken boru kayıcı desteklerinin seçimi anlatılmaktadır. Buhar dağıtım hatları bir tek veya birden fazla müşteriye hizmet verebilmektedirler.

5.1 Buhar Dağıtım Hat Çaplarının Tespit Edilmesi

Belirli kapasitelerdeki müşteri ihtiyaçlarına göre, belirli bir basınç ve sıcaklıkta dağıtımı yapılan doymuş buhar hatlarının çap seçimi, dağıtımda en önemli parametrelerden birini oluşturmaktadır. Dağıtım yapılacak mesafe, kapasite ve hat sonunda oluşacak basınç kaybı, boru hattı çapının belirlenmesinde etkindir. (ITT Grinnel,1976)

Burada çap seçiminde kullanılan formüller aşağıdadır. Boru hattı çapları oluşacak minimum basınç kayıplarına göre hesaplanmıştır. (www.tlv.com)

$$dp=f*L_p*V_s^2/(2*d*v'') \quad (5.1)$$

$$V_s=Q_s*v''/ A \quad (5.2)$$

$$A= ((d/2)^2*\pi) \quad (5.3)$$

$$RN=V_s*d/V_{is} \quad (5.4)$$

Çizelge 5.1 Boru hattı içindeki su ve buhar için kabul edilebilir akış hızları (ITT GRINNEL-PIPING DESIGN AND ENGINEERING)

Açıklama	Hız Aralıkları (m/s)	
Servis suyu hatları	0,6	1,5
Genel servis suyu borulamaları	1,2	3,0
Boylar besleme su hatları	1,8	4,0
Alçak basınç buharlı ısıtmalar ve proses borulaması	4,0	21,0
Alçak basınçlı buhar hatları	21,0	50,0
Yüksek basınçlı buhar hatları	50,0	120,0
Buhar makinaları ve pompa borulamaları	30,0	46,0
Buhar türbini borulamaları	46,0	100,0

Boru hattı boyunca olan akış, boru iç cidarındaki sürtünme nedeniyle iç basınçta düşüşe neden olur. Boru hattı içindeki basınç düşüşü akış hızının karesiyle yaklaşık olarak doğru orantılı ve boru hattı Efektif Uzunluğu ile doğru orantılıdır.

Boru hattının Efektif Uzunluğu, toplam boru hattı uzunluğuna, boru hattındaki, doğrusal akışı etkileyen vana dirsek gibi fittingslerin eşdeğer boru uzunluklarının eklenmesiyle bulunur.

Çizelge 5.2 Ticari olarak kullanılan bazı fittingslerin eşdeğer boru uzunlukları
(ITT GRINNEL-PIPING DESIGN AND ENGINEERING)

Fittings	Eşdeğer Uzunluk (m)
90° uzun dönüşlü kaynaklı dirsek	1
90° flanşlı dirsek	1
T	8
Redüksiyon	1
90° 5 x boru çaplı dirsek	1,3
Gate Vana	1
Globe Vana	25
Swing tip çek vana	7

Deneysel eşitlikler ve çizelgeler basınç düşüşlerinin makul bir değerde bulunabilmesi amacıyla düzenlenmişlerdir. Darcy Eşitliği sayısız deneylerden sonra, bu hesaplamalarda kullanılan ve rasyonel sonuçları veren en bilinen eşitliklerdendir. (5.5) Daha çok bilinen terimlerin dönüşümleriyle elde edilmiş temel bir eşitliktir. (5.6) ve (5.7) bu temel eşitlikte değişik düzenlerin yapılandırılması ile oluşturulmuş ve (5.8) ise boru hattı tasarımı yapan mühendislerinin en çok aşına oldukları terimlerle ifade edilmiştir.

$$dp = \frac{f \cdot L_p \cdot V_s^2}{2 \cdot g \cdot d} \quad (5.5)$$

$$dp = 2.24 \frac{f \cdot L_p \cdot V_s^2 \cdot \delta}{d} \quad (5.6)$$

$$dp = 0.002745 \frac{f * L_p * V_s^2 * \delta a}{d} \quad (5.7)$$

$$dp = 0.001295 \frac{f * L_p * V_s^2}{d * \delta w} \quad (5.8)$$

Reynold Sayısı RN ise aşağıdaki eşitlikten elde edilir.

$$RN = \frac{d * V_s}{\nu} \quad (5.9)$$

Çizelge 5.3 ASTM standartlarına göre boru çapları ve et kalınlıkları

	DN	Do	d	
NPS	mm	mm	mm	Et Kalınlığı
1/2"	DN15	21,3	15,8	2,75
3/4"	DN20	26,9	20,9	3
1"	DN25	33,7	26,6	3,55
1 1/4"	DN32	42,4	35,1	3,65
1 1/2"	DN40	48,3	40,9	3,7
2"	DN50	60,3	52,5	3,9
2 1/2"	DN65	76,1	62,7	6,7
3"	DN80	88,9	77,9	5,5
4"	DN100	114,3	102,3	6
5"	DN125	139,7	128,2	5,75
6"	DN150	168,4	154,1	7,15
8"	DN200	219,1	202,7	8,2
10"	DN250	273,3	254,5	9,4
12"	DN300	323,9	303,2	10,35
14"	DN350	355,6	333,3	11,15
16"	DN400	406,4	381	12,7
18"	DN450	457,2	428,7	14,25
20"	DN500	508	477,8	15,1
22"	DN550	558,8	528,6	15,1
24"	DN600	609,3	579,1	15,1

Yapılan istatistiklere göre buhar dağıtım hatlarının yerleşimden ve ulaşımdan kaynaklı, dirsek ve vana benzeri fittingsler nedeniyle hat uzunluğunun yaklaşık %8'i dirsek eşdeğeri olarak dirsek sayısına karşılık gelmektedir. Isıl genleşmelerden dolayı oluşan yüklerin minimizasyonu için gereken, dirseklerle imal edilen omegalarından dolayı da, boru hattı uzunluğunun %2'si kadarı dirsek adedine karşılık gelir.

Sch40 için boru çapları (22" ve 24" Sch 40'a ait olmamaktadır)

Santral Buhar Çıkış Şartları :

P=10 barG Doymuş Buhar

t= 184.1⁰ C

Q= 30 t/h

5.2 Boru Hattı Yük Analizleri

Buhar dağıtım hattı boyunca ısı ve basınç nedeniyle borularda genleşme oluşmakta ve bu genleşme uzun boru hatlarının ötelenmesine neden olmaktadır. Boru hattının yapısı gereği, sabitlenmesi veya bransman noktalarındaki birleşmeler gibi durumlar nedeniyle boru hatlarında gerilmeler meydana gelecektir . Boru hatlarının belirli bir hesaba göre yüklerinin minimize edilmemesi, boru köprülerinin ve boru hattının gereksiz zorlanmalara maruz kalmasına neden olacaktır. Bu nedenle dağıtım hatlarının tasarımında Boru Hattı Yük Analizleri de önemli rol oynamaktadır. Boru hatlarında yüklerin oluşmasında basınç ve ısı genleşme gibi iki temel etken mevcuttur.

Bir metalin uzama miktarı ΔL aşağıdaki formülle gösterilir.

$$\Delta L = L \cdot a_L \cdot \Delta t = L \cdot a_L \cdot (t_2 - t_1) \quad (5.10)$$

L=Metalin ısınmadan önceki uzunluğu m

a_L = Metalin Uzama Katsayısı (m/m⁰C)

$$\Delta t = t_1 - t_2 \text{ (Metalin ilk hareket derecesi ile son hareket derecesi arasındaki fark } ^0\text{C)} \quad (5.11)$$

Çeşitli metallerin α_L katsayıları (m/m^0C):

Çelik	$=1,18 * 10^{-5}$
Alaşımlı çelik	$=(0,95...1,6) 10^{-5}$
Çelik Döküm	$=1,4 * 10^{-3}$
Dökme Demir	$=(0,90...1,5) 10^{-3}$
Kızıl Döküm	$=1,8 * 10^{-8}$
Bakır	$=1,66 * 10^{-3}$
Alüminyum	$=2,38 * 10^{-3}$

Buhar dağıtım hatlarında konstrüktif olarak hazır çelik kompensatörler kullanmak mümkün olmakla birlikte omega veya loop olarak tabir edilen U kompensatörler, imalat, montaj ve maliyetlerinin daha uygun olması nedeniyle daha çok tercih edilmektedirler. Ayrıca bu şekilde imal edilen (omega) kompensatörler, boru hattına, hazır kompensatörlere göre ikinci bir avantaj olarak, daha az yük bindirmektedirler. Böylece daha küçük köprü veya slipper temelleri imal etmek mümkün olmaktadır. Dezavantajları ise fazla yer kaplamaları, boyutları ve dirsek kullanılarak imal edilmeleri nedeniyle Eşdeğer boru boyunu uzatmalarıdır. Omegaların yere dik pozisyonda olmaları durumunda ihmal edilecek miktarda da olsa kondensasyona neden olmaktadır. Fakat konstrüksiyon kolaylıkları ve yatırım maliyetlerini minimize etmeleri nedeniyle sanayii buhar hatlarında genel olarak tercih nedenidirler.

5.3 Buhar Hatları İzolasyonları ve Kayıcı Boru Desteklerinin Tasarımları

Yer üstünden giden buhar hatları dağıtımları çelik veya beton boru köprüleri, uygun olması durumunda duvara monte edilmiş konsollar veya uygun küçük temeller üzerinden yapılmaktadır. Buhar ve kondens boruları çap ve sıcaklıklarına göre boyutlandırılmaktadır. Kayıcılar ısı genleşmeler nedeniyle uzama yapmakta olan boruların bulundukları taşıyıcı sistem üzerinde izin verilen hareketlerini kolayca yapmalarını sağlamaktadırlar. Kayıcıların yükseklikleri ise izolasyon çaplarına göre belirlenmektedir.

5.3.1 Buhar Hattı İzolasyonları

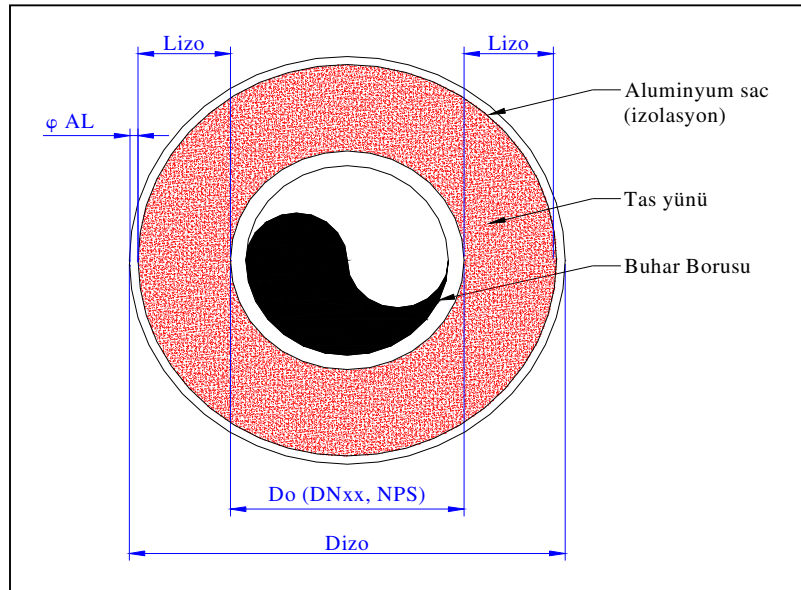
İzolasyon çapları ise buhar hattı sıcaklıkları ile ortam sıcaklıkları arasındaki farka göre belirlenmekle birlikte burada Marmara Bölgesi normal şartları göz önüne alınarak tespit edilmiştir.

Buhar ve kondens hatlarında izolasyonlar taş yünü ile yapılmaktadır. Boru çaplarına göre belirlenen taş yünü kalınlıkları ve izolasyon çapları ve izolasyon için gereken izolasyon

malzemesinin et kalınlıkları, çevresi ve 1 metresinin ağırlığı aşağıdaki çizelgede gösterilmektedir.

Çizelge 5.4 Buhar Hatlarının Çaplarına Göre İzolasyon Bilgileri Çizelgesi

			L _{izo}	D _{izo}	Ç _{izo}	Et Kalınlığı	Alan	Ağırlık
NPS	DN	Do (mm)	(mm)	(mm)	(mm)	φ _{AL} (mm)	m ² /m	kg/m
1/2"	DN15	21,3	50	121,3	391,1	0,6	0,391	0,63
3/4"	DN20	26,9	50	126,9	408,7	0,6	0,409	0,66
1"	DN25	33,7	50	133,7	430	0,6	0,430	0,7
1 1/4"	DN32	42,4	50	142,4	457,4	0,6	0,457	0,74
1 1/2"	DN40	48,3	50	148,3	475,9	0,6	0,476	0,77
2"	DN50	60,3	50	160,3	513,6	0,6	0,514	0,83
2 1/2"	DN65	76,1	50	176,1	563,2	0,6	0,563	0,91
3"	DN80	88,9	50	188,9	603,4	0,6	0,603	0,98
4"	DN100	114,3	50	214,3	683,2	0,6	0,683	1,11
5"	DN125	139,7	50	239,7	763	0,8	0,763	1,65
6"	DN150	168,4	50	268,4	853,2	0,8	0,853	1,84
8"	DN200	219,1	80	379,1	1201	0,8	1,201	2,59
10"	DN250	273,3	80	433,3	1371,3	0,8	1,371	2,96
12"	DN300	323,9	80	483,9	1530,2	0,8	1,530	3,31
14"	DN350	355,6	80	515,6	1629,8	0,8	1,630	3,52
16"	DN400	406,4	100	606,4	1915,1	0,8	1,915	4,14
18"	DN450	457,2	100	657,2	2074,7	0,8	2,075	4,48
20"	DN500	508	100	708	2234,2	0,8	2,234	4,83
22"	DN550	558,8	100	758,8	2393,8	0,8	2,394	5,17
24"	DN600	609,3	100	809,3	2552,5	0,8	2,553	5,51



Şekil 5.1 Buhar borusu tipik izolasyonu

Taş yünü korumak için gerekli koruma sacı galvaniz kaplı sac veya alüminyum olmakla birlikte uygulama kolaylığı bakımından Alüminyum sac yaygın olarak kullanılmaktadır. Alüminyum sacı et kalınlığı ½” den 4” ‘e kadar 0,6 mm, 5” ve üzeri borular için 0,8 mm yeterli olmaktadır.

Tipik bir buhar hattındaki izolasyona ait bilgileri veren simgeler, simge listesinde verilmiş olsalar da, şekili kolayca takip etmek açısından aşağıda yeniden verilmişlerdir.

L_{izo} : Taş yünü kalınlığı,

D_{izo} : İzolasyonlu Boru Çapı,

$\varnothing_{izo}$: izolasyonlu boru çevresi,

φ_{AL} : Alüminyum sac Et Kalınlığı,

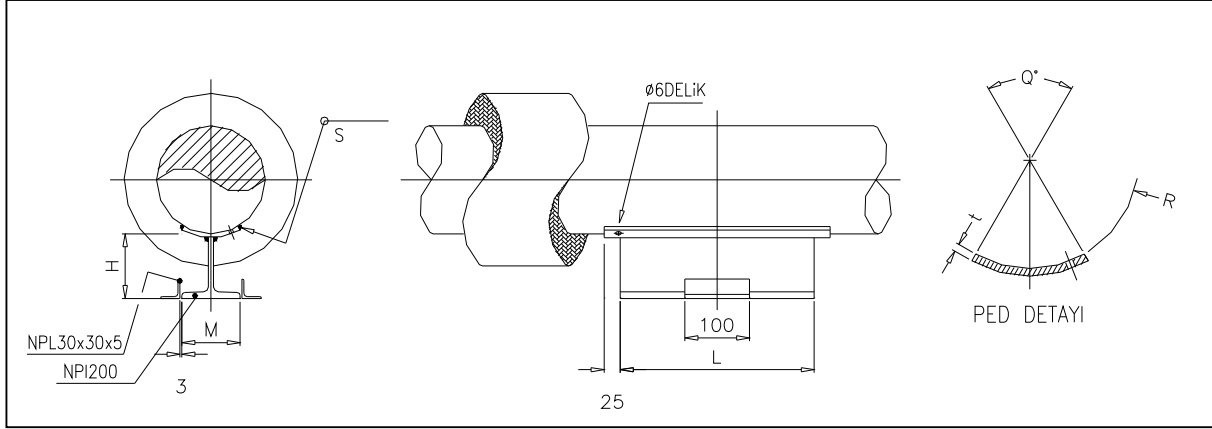
$1m^2/m$: 1 m boru hattı için gerekli alüminyum izolasyon sacı alanı,

$1kg/m$: 1 m boru hattında kullanılan alüminyum izolasyon sac ağırlığı.

5.3.2 Buhar ve Kondens Hattı Boru Kayıcıları

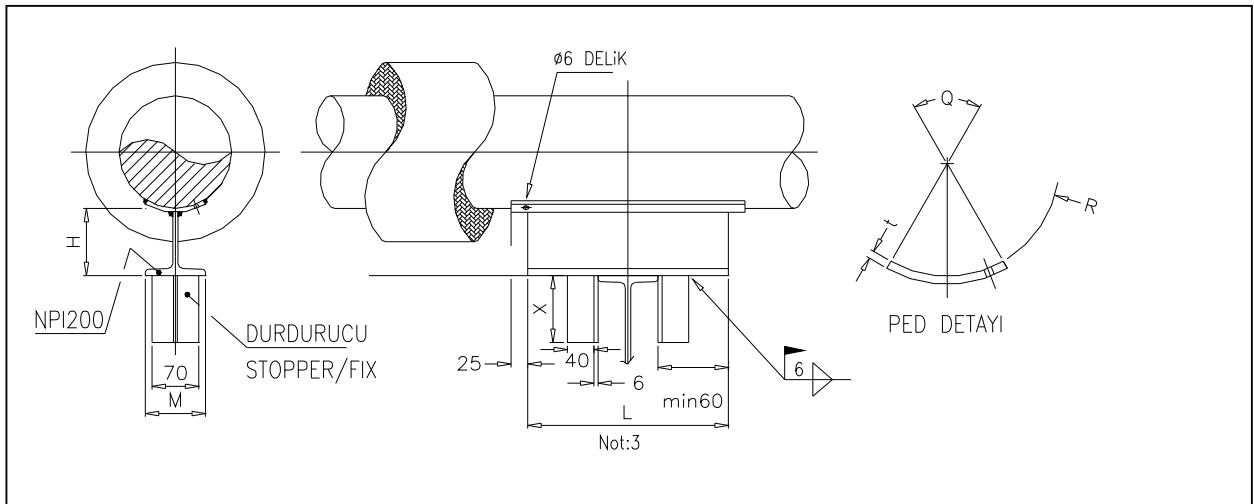
Ped boru malzemesinden kesilerek yapılabilir. Ped, boru et kalınlığı 6 mm den küçük ise boru et kalınlığı ile aynı kalınlıkta seçilebilir. Ped kalınlığı minimum boru et kalınlığı ile aynı olmalıdır. X boyunun uzunluğu (Şekil 5.3) profil genişliğine bağlı olarak değişmektedir. Aşağıda buhar ve kondens hatlarında kullanılan kayıcıların boru çaplarına göre tasarımları verilmektedir.

DN 15 ve DN 150 arası boruların kayıcı boru desteklerinin standartları:



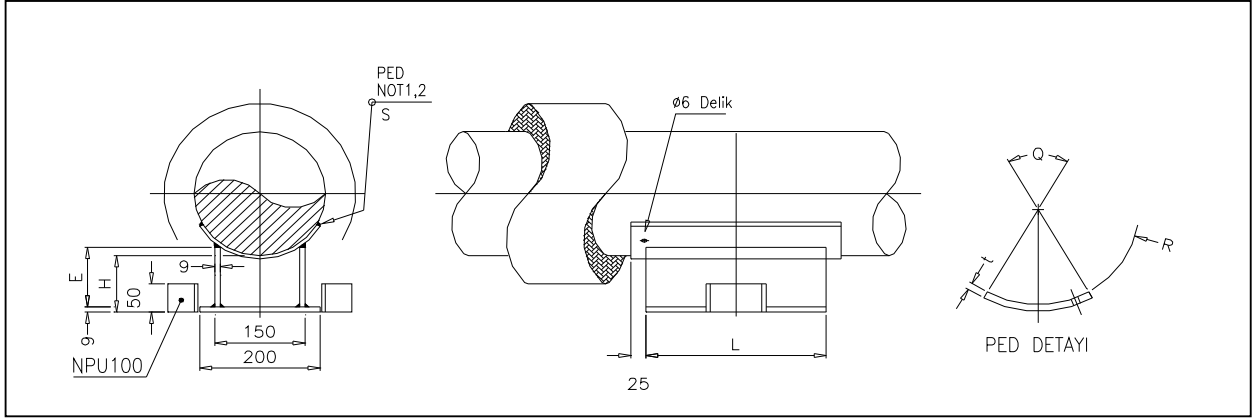
Şekil 5.2 DN 15 ve DN 150 arası kayıcı boru destekleri

DN 15 ve DN 150 arası boru kayıcılarının sabit-durdurucu olarak kullanılması durumundaki genel konstrüksiyon standardı:



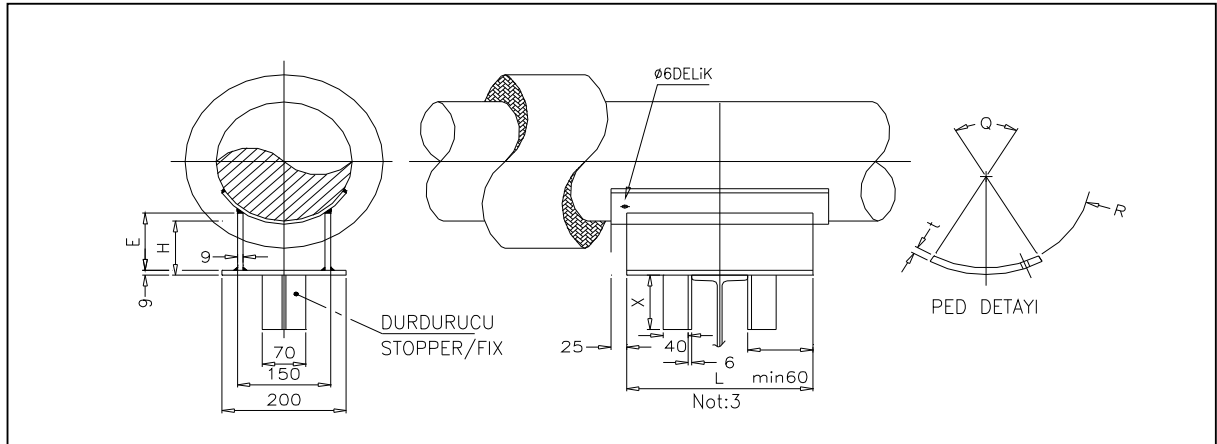
Şekil 5.3 DN15 - DN 150 arası boruların, kayıcı boru destekleri

DN 150 ve DN 600 arası boruların, kayıcı boru desteklerinin standartları:



Şekil 5.4 DN150 - DN 600 arası kayıcı boru destekleri

DN 150 ve DN 600 arası boru kayıcılarının sabit-durdurucu olarak kullanılması durumundaki genel konstrüksiyon standardı:



Şekil 5.5 DN150 - DN 600 arası kayıcı boru destekleri

Çizelge 5.5 DN15 - DN 150 Arası Kayıcı Boru Destek Boyutları

NPS	DN	H	R	Q ⁰	t
1/2"	15	100	11	120 ⁰	3
3/4"	20		13		
1"	25		17		
1 1/2"	40		24		
2"	50		30		6
3"	80		44	90 ⁰	
4"	100		57	60 ⁰	
5"	150		84		

Çizelge 5.6 DN150 - DN 600 Arası Kayıcı Boru Destek Boyutları

DN	H	E	R	Q ⁰	t
200	100	113	110	120 ⁰	6
	150	163			
	200	213			
250	100	106	137		
	150	156			
	200	206			
300	100	103	162	90 ⁰	
	150	153			
	200	203			
350	100	101	178		
	150	151			
	200	201			
400	200	101	318		
450	200	230	358		
500	200	226	399		
550	200	218	438		
600	200	216	478		

Çizelge 5.7 İzolasyon Kalınlığına Göre Boru Desteği H Mesafesi (DN15 –DN600)

H _{supp.}	L _{izo} (İzolasyon Kalınlığı)
100	75 mm
150	76 mm - 125 mm
200	126 mm- 175 mm

Çizelge 5.8 Boru Hattı Toplam Uzamasına Göre Boru Desteği L Mesafesi (DN15 –DN600)

L_{supp.}	ΔL (Isıl Uzama miktarı)
300	75 mm'ye kadar
450	76 - 150 mm arası
600	151 mm - 230 mm arası

5.3.2.1 Buhar Hattı Kayıcılarının Mesnet Mesafeleri

Buhar hatlarının Hidrostatik testler sırasında ve buhar hattının işletmesi sırasında izin verilebilir sehimleri karşılayacak boru desteği konumlarının, birbirlerinden uzaklıklarına, yani mesnet noktalarının mesafelerine ait tablo aşağıdadır. Her ne kadar sanayiide rastlanan uygulamalar birebir bu ölçülere uymadıkları görülse de tasarım ve maliyetlerde hesaplara dahil edilen gerekli mesafelerdir.

Çizelge 5.9 Bir Buhar Hattı Üzerindeki Kayıcıların Mesnet Mesafeleri

NPS	DN	Kayıcı Mesafeleri (mm)
1/2"	DN15	1850
3/4"	DN20	2000
1"	DN25	2150
1 1/4"	DN32	2400
1 1/2"	DN40	2700
2"	DN50	3000
2 1/2"	DN65	3350
3"	DN80	3650
4"	DN100	4250
5"	DN125	4900
6"	DN150	5200
8"	DN200	5800
10"	DN250	6700
12"	DN300	7000
14"	DN350	7600
16"	DN400	8200
18"	DN450	8500
20"	DN500	9100
22"	DN550	9100
24"	DN600	9750

5.3.3 Boru Hatlarının Birim Maliyet Analizleri

Buhar hatlarının maliyetlerine etki eden parametreleri incelediğimizde, tasarım esaslarına ve Santral ile müşteri veya bir önceki buhar dağıtım noktası ile tüketim noktası (kaynak ve kuyu) arasındaki mesafenin etken olduğunu görmekteyiz. Aşağıda maliyetleri etkileyen bu faktörleri inceleyelim:

- Buhar Tüketimi: Q (t/h)
- Buhar Hattı Eşdeğer Mesafesi : L_p (m)
- d_p : İzin verilen basınç düşümü (bar)
- Fittings Sayısı (adet, ileride yapılacak olan hesaplarda genel olarak dirsek olarak ele alınacak olup aşağıdaki eşitliklerde Eşdeğer Mesafeye dahil edilmiştir.
- Buhar Hattı Çapı: D_o (mm), (\$/m)
- Boru Desteği : K_s (kg/m) , (\$/m)
- İzolasyon Çapı: D_{izo} (mm)
- İzolasyon Sacı: D_{sac} (m²/m) , (\$/m)
- Taş yünü : D_{TY} (m²/m), (\$/m)
- Boya Alanı : B_a (m²/m), (\$/m)
- Çelik Konstrüksiyon : $\check{C}k$ (kg/m) , (\$/m)
- İnşaat(temel): St (adet/m) , (\$/m)

Boru hattı çapı Buhar Tüketim miktarının (debi) ve mesafenin bir fonksiyonudur: İzin verilen basınç düşümü de buna etken olduğu için (d_p (bar)) aşağıdaki fonksiyonda dahil olarak kabul edilmiştir. İzin verilen basınç düşümleri, boru çapının belirlenmesinde doğrudan etken olmaktadır.

$$D_o = f(Q , L_p,) \text{ (mm)} \quad (5.12)$$

Boru hattının çıplak maliyeti, borunun satın alma ve işçilik maliyetlerinin toplamı sonucudur.(Çizelge 5.10) :

$$\Sigma MDo = \Sigma MDo_s + \Sigma MDo_i = f(Q , L_p,)_s + f(Q , L_p,)_i = Do_s + Do_i \text{ ($/m)} \quad (5.13)$$

Kayıcı veya sabit/durdurucu boru destekleri (Support), boru çapına göre belirlenerek tasarlanmaktadır ve bulunan boru çapının bir fonksiyondur. (Çizelge 5.11)

$$K_s = f(D_o) = f(f(Q, L_p)) \text{ (adet/m, kg/m)} \quad (5.14)$$

Maliyetlere katılacak olan Boru Desteği bedeli, Boru Desteği malzemesi, imal edileceği borunun birim metresi başına düşen satın alma ve işçiliklerine bağlıdır: (Çizelge 5.11)

$$\Sigma MK_s = \Sigma MK_{ss} + \Sigma MK_{si} = f(K_s)_{s,i} = (K_s)_s + (K_s)_i \text{ ($/m)} \quad (5.15)$$

İzolasyon kalınlığı boru çapına göre belirlenmekte ve bu da İzolasyon çapını vermektedir, izolasyon çapı Boru çapının bir fonksiyonudur (Çizelge 5.12):

$$D_{izo} = f(D_o) = f(f(Q, L_p)) \text{ (mm)} \quad (5.16)$$

İzolasyon Maliyeti, izolasyon malzemelerinin, hat üzerinde metre başına düşen birim satın alma ve işçilik maliyetlerinin toplamıdır.

$$\Sigma M_{izo} = f(D_{izo})_s + f(D_{izo})_i \quad (5.17)$$

$$f(D_{izo})_s = (D_{sac} + D_{TY})_s, f(D_{izo})_i = f(D_{sac} + D_{TY})_i \text{ ve bu eşitliklerden yola çıkarak} \quad (5.18)$$

$$\Sigma M_{izo} = (D_{sac} + D_{TY})_s + (D_{sac} + D_{TY})_i \text{ ($/m)} \quad (5.19)$$

olmaktadır.

İzolasyon ile ilgili kısıtlar;

$$f(D_{izo}) = \begin{cases} \frac{1}{2}'' \leq D_o \leq 4'' \Rightarrow D_{sac} = 0.6 \text{ mm} \\ 4'' < D_o < 24'' \Rightarrow D_{sac} = 0.8 \text{ mm} \\ \frac{1}{2}'' \leq D_o \leq 6'' \Rightarrow D_{TY} = 50 \text{ mm} \\ 8'' \leq D_o \leq 12'' \Rightarrow D_{TY} = 80 \text{ mm} \\ 14'' \leq D_o \leq 24'' \Rightarrow D_{TY} = 100 \text{ mm} \end{cases} \quad (5.20)$$

$\frac{1}{2}'' \leq D_o \leq 24''$ için

Boru hattı için kullanılan boya alanı ve dolayısıyla miktarı, doğrudan boru çapına bağlıdır.

$$B_a = f(D_o) = f(f(Q, L_p)) \text{ (m}^2\text{/m)} \quad (5.21)$$

Boya maliyeti Boya malzemesi birim metre başına satın alma ve işçiliklerinin toplamıdır. (Çizelge 5.13 de satın alma ve işçiliklerin toplam tutarları verilmiştir.) :

$$\Sigma B_a = f(B_a)_{s,i} = (B_a)_s + (B_a)_i \text{ ($/m)} \quad (5.22)$$

Buhar hattının taşınması için gerekli çelik köprü konstrüksiyonu, boru çapına göre belirli yükleri taşıyacak şekilde tasarlanmakta olup sonuç itibarıyla boru çapının fonksiyonudur. Gerekli çelik köprü konstrüksiyonları, statik hesaplara göre belirlenerek metre başına ağırlıkları çıkarılmıştır. Çizelge 5.14 de bu ağırlıklar da verilmiştir. Çelik Köprüler standart olarak 6 metrede bir temel üzerine taşınmakta olup yol ve kavşak geçişlerinde bu mesafe yol veya kavşağın mesafesine denk gelmektedir. Metre başına ortalama ağırlıklar hesaplanırken bu mesafelerden dolayı olacak olan ek değerlerde ortalamalara dahil edilmiştir.

$$\zeta k = f(D_o) \text{ (kg/m)} \quad (5.23)$$

Çelik Köprü Maliyeti, malzeme satın alma ve işçiliklerinin toplamıdır. (Çizelge 5.14) :

$$\Sigma \zeta k = f(\zeta k)_{s,i} = \zeta k_s + \zeta k_i \text{ ($/m)} \quad (5.24)$$

Çelik Köprü ile ilgili kısıtlar;

$$f(\zeta k) = \begin{cases} \frac{1}{2}'' \leq D_o \leq 1 \frac{1}{2}'' \Rightarrow \zeta k = 60 \text{ kg/m} \\ 2'' \leq D_o \leq 3'' \Rightarrow \zeta k = 85 \text{ kg/m} \\ 4'' \leq D_o \leq 8'' \Rightarrow \zeta k = 115 \text{ kg/m} \\ 10'' \leq D_o \leq 16'' \Rightarrow \zeta k = 135 \text{ kg/m} \\ 18'' \leq D_o \leq 24'' \Rightarrow \zeta k = 155 \text{ kg/m} \end{cases} \quad (5.25)$$

$\frac{1}{2}'' \leq D_o \leq 24''$ için

Buhar hatlarında dağıtımında, inşaat işleri, çelik köprülerin temelleri veya boruların doğrudan taşınmaları durumunda, slipper olarak isimlendirilen küçük temeller ile gerçekleştirilmektedir. Temeller standart olarak 6 adet/m yapılmakla birlikte taşımakta olduğu çelik boru köprüsünün büyüklüğüne ve taşıyacağı yüke göre tasarımı değişmektedir. Temeller, çelik köprülerin bir fonksiyonu olarak ele alınabilirler. (Çizelge 5.14):

$$St = f(\zeta k) = f(f(D_o)) \text{ (adet/m)} \quad (5.26)$$

Yine benzeri şekilde bir temelin birim maliyeti, bulunduğu hat üzerinde bir metre için gerekli malzeme satın alması ile işçilik maliyetlerinin toplamıdır.

$$\Sigma MSt = f(St)_{s,i} = St_s + St_i (\$/m) \quad (5.27)$$

Yukarıda verilen eşitliklerden yola çıkarak, bir buhar hattı tasarımı için gerekli parametreleri (5.12 , 5.14 , 5.16 , 5.21 , 5.23 , ve 5.26) fonksiyonlarının birleşmesi ile elde edebiliriz. Buna göre;

Özet olarak:

Bir Buhar Dağıtım Hattının Tasarımı: Boru çapı (Do) , debi ve mesafeye bağlıdır. ((5.13) de bu durum görülmektedir) Boru desteği (support), İzolasyon, Boya, Çelik Köprü ve Temel ise sadece boru çapının bir fonksiyonudur:

$$\text{Tasarım} = f(Do) \Rightarrow f(Q, Lp, K_s, D_{izo}, Ba, Çk, St) \quad (5.28)$$

Buna göre Bir buhar hattının maliyeti en genel itibarıyla (5.12 , 5.14 , 5.16 , 5.21 , 5.23 , ve 5.26) fonksiyonlarının sonucunda ulaşılan maliyetlerin toplamıdır:

(Buhar Hattı Maliyeti = Boru+Boru Desteği +İzolasyon+Boya+Çelik Köprü+Temel maliyeti)

$$\Sigma M_{\text{Buhar Hattı}} = \Sigma M_{do} + \Sigma MK_s + \Sigma M_{izo} + \Sigma B_a + \Sigma Çk + \Sigma MSt \quad (5.29)$$

$$\Sigma M_{\text{Buhar Hattı}} = [f(Q,Lp)_s + f(Q,Lp)_i] + f(K_s)_{s,i} + [f(D_{izo})_s + f(D_{izo})_i] + f(B_a)_{s,i} + f(Çk)_{s,i} + f(St)_{s,i} \quad (5.30)$$

$$\Sigma M_{\text{Buhar Hattı}} = f(Q,Lp)_s + f(K_s)_s + f(D_{izo})_s + f(B_a)_s + f(Çk)_s + f(St)_s + f(Q,Lp)_i + f(K_s)_i + f(D_{izo})_i + f(B_a)_i + f(Çk)_i + f(St)_i \quad (5.31)$$

$$\Sigma M_{\text{Buhar Hattı}} = \{f(Q,Lp) + f(K_s) + f(D_{izo}) + f(B_a) + f(Çk) + f(St)\}_s + \{f(Q,Lp) + f(K_s) + f(D_{izo}) + f(B_a) + f(Çk) + f(St)\}_i \quad (5.32)$$

$$\Sigma M_{\text{Buhar Hattı}} = [(Do_s + Do_i)] + [(K_s)_s + (K_s)_i] + [(D_{sac} + D_{TY})_s + (D_{sac} + D_{TY})_i] + [(B_a)_s + (B_a)_i] + [Çk_s + Çk_i] + [St_s + St_i] \quad (5.33)$$

Eşitlikleri elde edilebilmektedir.

Buhar hatlarının imalat ve montajları neticesinde ortaya çıkan yatırım maliyetlerine ait analizler aşağıda detaylı olarak verilmiştir. Buhar hatlarında maliyet analizleri yatırım aşamasında, buhar dağıtım hatlarının mühendislik tasarımlarını takiben yapılır ve en önemli unsuru oluşturmaktadır. Maliyet analiz tabloları her bir buhar hattı çapı için gereken

malzeme satın alma ve işçilik birim fiyatları üzerinden hesaplanarak oluşturulmuştur.

Ayrıca tüketim gereksinimi olan ve her i noktasından j noktasına giden bir ark/hat boyunca tüketim miktarını karşılayacak olan boru çapının minimum olması (c=constant olmak üzere) aşağıdaki şartlara bağlıdır;

$$Q_{i,j}=c \Rightarrow \min Do_{i,j}=f(Q, \min_{i,j}, L_p) \quad (5.34)$$

$$L_{p,i,j}=c \Rightarrow \min Do_{i,j}=f(\min Q_{i,j}, L_p) \quad (5.35)$$

Çizelge 5.10 Buhar Hatları Birim Maliyet Analizi-Boru Maliyetleri

		Boru				
NPS	DN	Birim Ağırlık	Birim işçilik	Birim işçilik	Birim Satın Alma	Toplam Boru maliyeti
		kg/m	\$/kg	\$/m	\$/m	\$/m
1/2"	DN15	0,94	1,75	1,65	2,81	4,46
3/4"	DN20	1,32	1,75	2,31	3,36	5,67
1"	DN25	1,72	1,75	3,01	4,37	7,38
1 1/4"	DN32	2,67	1,75	4,67	5,5	10,2
1 1/2"	DN40	3,44	1,75	6,02	6,1	12,1
2"	DN50	3,97	1,1	4,37	6,25	10,6
2 1/2"	DN65	4,11	1,1	4,52	8,2	12,7
3"	DN80	5,75	1,1	6,33	9,72	16
4"	DN100	6,76	1,1	7,44	14,4	21,8
5"	DN125	10,9	1,1	12	22,1	34,1
6"	DN150	46,6	1,1	51,3	32,8	84
8"	DN200	20,1	1,1	22,1	53,1	75,2
10"	DN250	33,1	1,1	36,4	84,2	121
12"	DN300	52,3	1,1	57,5	110	168
14"	DN350	68,4	1,1	75,2	138	213
16"	DN400	85,2	1,1	93,7	184	278
18"	DN450	107	1,1	118	235	353
20"	DN500	137	1,1	151	264	415
22"	DN550	153	1,1	168	361	529
24"	DN600	209	1,1	230	695	925

Çizelge 5.11 Buhar Hatları Birim Maliyet Analizi-Kayıcılık Boru Desteği Maliyetleri

		Kayıcılık Boru Desteği (Ks)						
NPS	DN	Kayıcılık mesafesi	Boru Hattı metre başına kayıcılık adedi	Kayıcılık Boru Desteği Ağırlığı	Boru Desteği malzemesi Satın alma	Boru Desteği işçilik	toplam Boru Desteği Maliyeti	Boru Hattı metre başına Boru Desteği Maliyeti
		Adet/m	Adet/m	kg /Adet	\$/Adet	\$/Adet	\$/Adet	\$/m
1/2"	DN15	1,85	0,54	4,15	2,49	7,26	9,75	5,27
3/4"	DN20	2,00	0,50	4,20	2,52	7,35	9,87	4,94
1"	DN25	2,15	0,47	4,30	2,58	7,53	10,11	4,70
1 1/4"	DN32	2,40	0,42	4,41	2,65	7,72	10,36	4,32
1 1/2"	DN40	2,70	0,37	4,47	2,68	7,82	10,50	3,89
2"	DN50	3,00	0,33	4,64	2,78	5,10	7,89	2,63
2 1/2"	DN65	3,35	0,30	5,05	3,03	5,56	8,59	2,56
3"	DN80	3,65	0,27	5,32	3,19	5,85	9,04	2,48
4"	DN100	4,25	0,24	5,87	3,52	6,46	9,98	2,35
5"	DN125	4,90	0,20	6,53	3,92	7,18	11,10	2,27
6"	DN150	5,20	0,19	7,30	4,38	8,03	12,41	2,39
8"	DN200	5,80	0,17	8,98	5,39	9,88	15,27	2,63
10"	DN250	6,70	0,15	11,06	6,64	12,17	18,80	2,81
12"	DN300	7,00	0,14	13,29	7,97	14,62	22,59	3,23
14"	DN350	7,60	0,13	15,00	9,00	16,50	25,50	3,36
16"	DN400	8,20	0,12	18,39	11,03	20,23	31,26	3,81
18"	DN450	8,50	0,12	22,22	13,33	24,44	37,77	4,44
20"	DN500	9,10	0,11	25,41	15,25	27,95	43,20	4,75
22"	DN550	9,10	0,11	27,62	16,57	30,38	46,95	5,16
24"	DN600	9,75	0,10	29,82	17,89	32,80	50,69	5,20

Çizelge 5.12 Buhar Hatları Birim Maliyet Analizi-İzolasyon

İzolasyon													
NPS	DN	Dış Çap mm	Taşıyünü İzolasyon Kalınlığı mm	İzolasyon (Taşıyünü) Çevce m	Boru Hattı Metresindeki Taşıyünü Alanı m ² /m	İzolasyon Sacı Alanı m ² /m	Birim Satın alma Sac \$/m ²	Birim Satın alma Taş yünü \$/m ²	Birim İşçilik \$/m ²	Taşıyünü Satınalma Maliyeti \$/m	İzolasyon Sacı Satın alma \$/m	İzolasyon işçilik \$/m	Toplam İzolasyon Maliyeti \$/m
1/2"	DN15	21,30	50	0,22	0,22	0,39	2,50	4,80	3,73	1,08	0,98	1,46	3,51
3/4"	DN20	26,90	50	0,24	0,24	0,41	2,50	4,80	3,73	1,16	1,02	1,52	2,55
1"	DN25	33,70	50	0,26	0,26	0,43	2,50	4,80	3,73	1,26	1,08	1,60	2,68
1 1/4"	DN32	42,40	50	0,29	0,29	0,46	2,50	4,80	3,73	1,39	1,14	1,71	2,85
1 1/2"	DN40	48,30	50	0,31	0,31	0,48	2,50	4,80	3,73	1,48	1,19	1,78	2,96
2"	DN50	60,30	50	0,35	0,35	0,51	2,50	4,80	3,73	1,66	1,28	1,92	3,20
2 1/2"	DN65	76,10	50	0,40	0,40	0,56	2,50	4,80	3,73	1,90	1,41	2,10	3,51
3"	DN80	88,90	50	0,44	0,44	0,60	2,50	4,80	3,73	2,09	1,51	2,25	3,76
4"	DN100	114,30	50	0,52	0,52	0,68	2,50	4,80	3,73	2,48	1,71	2,55	4,26
5"	DN125	139,70	50	0,60	0,60	0,76	3,40	4,80	3,73	2,86	2,59	2,85	5,44
6"	DN150	168,40	50	0,69	0,69	0,85	3,40	4,80	3,73	3,29	2,90	3,18	6,08
8"	DN200	219,10	80	0,94	0,94	1,20	3,40	7,70	3,73	7,24	4,08	4,48	8,56
10"	DN250	273,30	80	1,11	1,11	1,37	3,40	7,70	3,73	8,55	4,66	5,11	9,78
12"	DN300	323,90	80	1,27	1,27	1,53	3,40	7,70	3,73	9,77	5,20	5,71	10,91
14"	DN350	355,60	80	1,37	1,37	1,63	3,40	7,70	3,73	10,54	5,54	6,08	11,62
16"	DN400	406,40	100	1,59	1,59	1,92	3,40	9,60	3,73	15,27	6,51	7,14	13,65

İzolasyon													
NPS	DN	Dış Çap mm	Taşıyıcı İzolasyon Kalınlığı mm	İzolasyon (Taşıyıcı) Çevre m	Boru Hatı Metresindeki Taşıyıcı Alanı m ² /m	İzolasyon Sacı Alanı m ² /m	Birim Satın alma Sac \$/m ²	Birim Satın alma Taşıyıcı \$/m ²	Birim İşçilik \$/m ²	Taşıyıcı Satınalma Maliyeti \$/m	İzolasyon Sacı Satın alma \$/m	İzolasyon işçilik \$/m	Toplam İzolasyon Maliyeti \$/m
18"	DN450	457,20	100	1,75	1,75	2,07	3,40	9,60	3,73	16,80	7,05	7,74	14,79
20"	DN500	508,00	100	1,91	1,91	2,23	3,40	9,60	3,73	18,34	7,60	8,33	15,93
22"	DN550	558,80	100	2,07	2,07	2,39	3,40	9,60	3,73	19,87	8,14	8,93	17,07
24"	DN600	609,30	100	2,23	2,23	2,55	3,40	9,60	3,73	21,39	8,68	9,52	18,20

Çizelge 5.13 Buhar Hatları Birim Maliyet Analizi-Boya

Boya (B _a)					
NPS	DN	Dış Çap mm	Boru Dış Yüzey Alanı m ² /m	Boya satın alma ve işçilik Birim Maliyeti \$/m ²	Toplam Boyama Maliyeti \$/m
1/2"	DN15	21,30	0,067	3,75	0,25
3/4"	DN20	26,90	0,085	3,75	0,32
1"	DN25	33,70	0,106	3,75	0,40
1 1/4"	DN32	42,40	0,133	3,75	0,50
1 1/2"	DN40	48,30	0,152	3,75	0,57
2"	DN50	60,30	0,189	3,75	0,71
2 1/2"	DN65	76,10	0,239	3,75	0,90
3"	DN80	88,90	0,279	3,75	1,05

Boya (B _a)					
NPS	DN	Dış Çap	Boru Dış Yüzey Alanı	Boya satın alma ve işçilik Birim Maliyeti	Toplam Boyama Maliyeti
		mm	m ² /m	\$/m ²	\$/m
4"	DN100	114,30	0,359	3,75	1,35
5"	DN125	139,70	0,439	3,75	1,65
6"	DN150	168,40	0,529	3,75	1,98
8"	DN200	219,10	0,688	3,75	2,58
10"	DN250	273,30	0,859	3,75	3,22
12"	DN300	323,90	1,018	3,75	3,82
14"	DN350	355,60	1,117	3,75	4,19
16"	DN400	406,40	1,277	3,75	4,79
18"	DN450	457,20	1,436	3,75	5,39
20"	DN500	508,00	1,596	3,75	5,98
22"	DN550	558,80	1,756	3,75	6,58
24"	DN600	609,30	1,914	3,75	7,18

Çizelge 5.14 Buhar Hatları Birim Maliyet Analizi-Çelik Köprü ve İnşaat

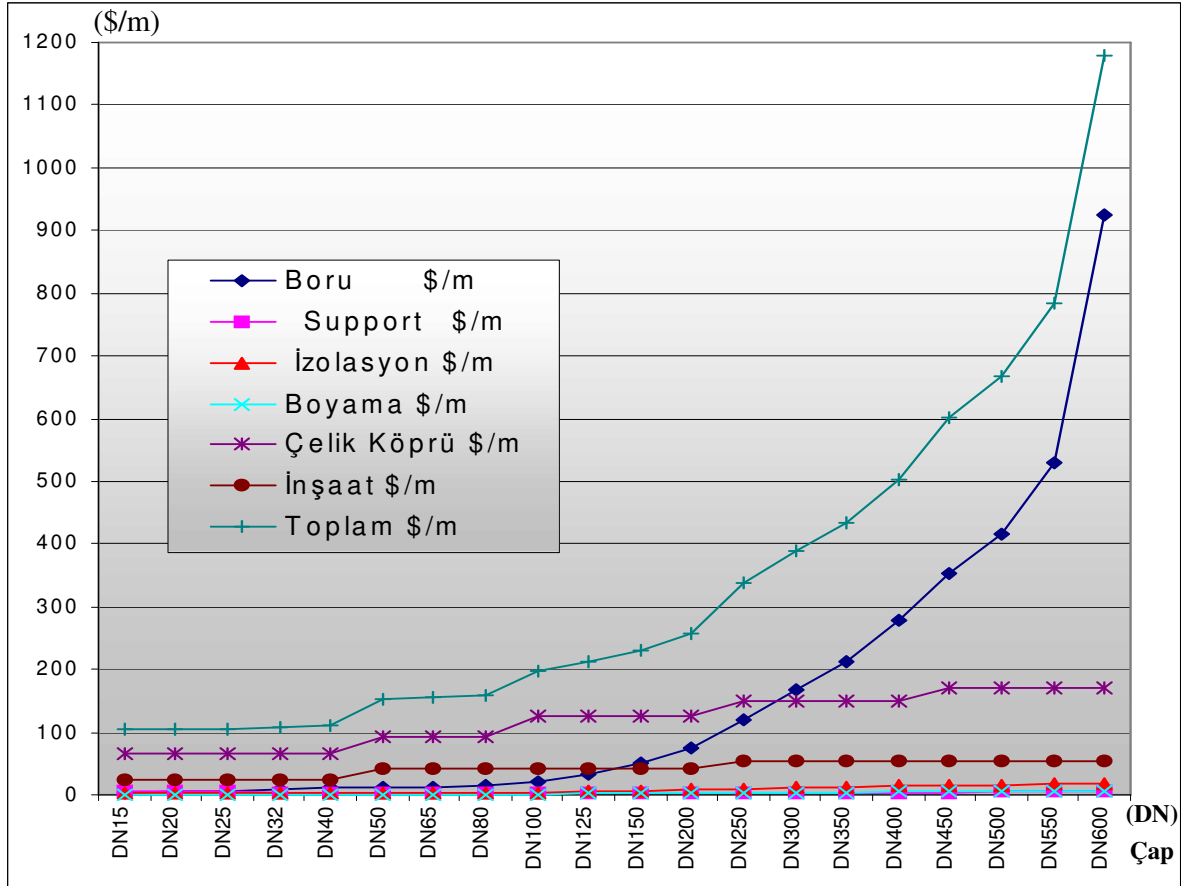
NPS	DN	Çelik Köprü				İnşaat		
		Birim	birim	birim	Çelik Maliyeti	Temel İnşaatı	Temel Mesafesi	Birim
		Çelik Satınalma	Çelik işçilik	Çelik Ağırlık				Temel Maliyeti
		\$/kg	\$/kg	kg/m	\$/m	\$/Adet	Adet/m	\$/m
1/2"	DN15	0,6	0,5	60	66	150	6	25,0
3/4"	DN20	0,6	0,5	60	66	150	6	25,0
1"	DN25	0,6	0,5	60	66	150	6	25,0
1 1/4"	DN32	0,6	0,5	60	66	150	6	25,0
1 1/2"	DN40	0,6	0,5	60	66	150	6	25,0
2"	DN50	0,6	0,5	85	93,5	250	6	41,7
2 1/2"	DN65	0,6	0,5	85	93,5	250	6	41,7
3"	DN80	0,6	0,5	85	93,5	250	6	41,7
4"	DN100	0,6	0,5	115	127	250	6	41,7
5"	DN125	0,6	0,5	115	127	250	6	41,7

NPS	DN	Çelik Köprü					İnşaat	
		Birim	birim	birim				Birim
		Çelik Satınalma	Çelik İşçilik	Çelik Ağırlık	Çelik Maliyeti	Temel İnşaatı	Temel Mesafesi	Temel Maliyeti
		\$/kg	\$/kg	kg/m	\$/m	\$/Adet	Adet/m	\$/m
6"	DN150	0,6	0,5	115	127	250	6	41,7
8"	DN200	0,6	0,5	115	127	250	6	41,7
10"	DN250	0,6	0,5	135	149	325	6	54,2
12"	DN300	0,6	0,5	135	149	325	6	54,2
14"	DN350	0,6	0,5	135	149	325	6	54,2
16"	DN400	0,6	0,5	135	149	325	6	54,2
18"	DN450	0,6	0,5	155	171	325	6	54,2
20"	DN500	0,6	0,5	155	171	325	6	54,2
22"	DN550	0,6	0,5	155	171	325	6	54,2
24"	DN600	0,6	0,5	155	171	325	6	54,2

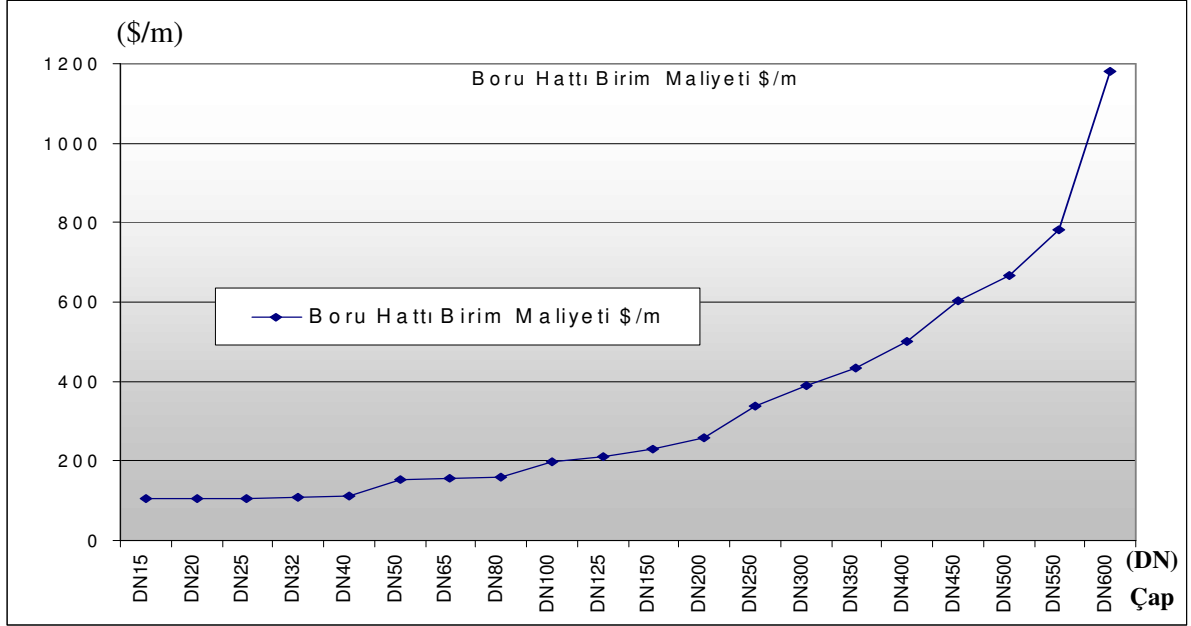
Çizelge 5.15 Buhar Hatları Birim Maliyet Analizi-Özet

NPS	DN	Boru	Boru Desteği	İzolasyon	Boyama	Çelik Köprü	İnşaat	Toplam
		\$/m	\$/m	\$/m	\$/m	\$/m	\$/m	\$/m
1/2"	DN15	4,455	5,27	3,51	0,25	66,00	25,00	104,49
3/4"	DN20	5,67	4,94	2,55	0,32	66,00	25,00	104,47
1"	DN25	7,38	4,70	2,68	0,40	66,00	25,00	106,16
1 1/4"	DN32	10,17	4,32	2,85	0,50	66,00	25,00	108,84
1 1/2"	DN40	12,12	3,89	2,96	0,57	66,00	25,00	110,54
2"	DN50	10,62	2,63	3,20	0,71	93,50	41,67	152,32
2 1/2"	DN65	12,72	2,56	3,51	0,90	93,50	41,67	154,86
3"	DN80	16,05	2,48	3,76	1,05	93,50	41,67	158,50
4"	DN100	21,84	2,35	4,26	1,35	126,50	41,67	197,95
5"	DN125	34,09	2,27	5,44	1,65	126,50	41,67	211,61
6"	DN150	51,02	2,39	6,08	1,98	126,50	41,67	229,64
8"	DN200	75,21	2,63	8,56	2,58	126,50	41,67	257,15
10"	DN250	120,6	2,81	9,78	3,22	148,50	54,17	339,08

NPS	DN	Boru \$/m	Boru Desteği \$/m	İzolasyon \$/m	Boyama \$/m	Çelik Köprü \$/m	İnşaat \$/m	Toplam \$/m
12"	DN300	167,9	3,23	10,91	3,82	148,50	54,17	388,55
14"	DN350	213,2	3,36	11,62	4,19	148,50	54,17	435,07
16"	DN400	277,7	3,81	13,65	4,79	148,50	54,17	502,64
18"	DN450	352,7	4,44	14,79	5,39	170,50	54,17	601,99
20"	DN500	414,7	4,75	15,93	5,98	170,50	54,17	666,03
22"	DN550	529,3	5,16	17,07	6,58	170,50	54,17	782,78
24"	DN600	924,9	5,20	18,20	7,18	170,50	54,17	1180,14



Şekil 5.6 Boru hattı maliyetini oluşturan unsurların karşılaştırmalı grafiği



Şekil 5.7 Çaplarına göre boru hattı toplam maliyetini gösterir grafik (\$/m)

5.4 Bir Organize Sanayii Bölgesindeki Kojenerasyon Santrali

Yer Optimizasyonu için Akenerji Uşak Organize Sanayii Bölgesinde bulunan Kojenerasyon Santrali incelenecektir.

Mevcut USOB Akenerji Kojenerasyon Santrali 5.890 m² alana kurulu ve en son 2004 yılında eklenen 3. Gaz Türbini ve Buhar kazanı ile toplam 15 MW gücünde elektrik, 30 ton/h buhar kapasitesinde olup 2001 yılında kurulmuştur. 2004 yılında Başlangıçta 2 müşteriye hizmet verirken zaman içinde 23 müşteriye hizmet verir hale gelmiştir.

İncelemelerde müşterilerin sözleşme kapasiteleri ile kullandıkları miktarların,piyasa şartları neticesinde değişken olduğu görülmektedir. Bu nedenle yapılan boru dağıtım hattı yatırımları, sözleşme miktarına ve/veya müşterinin son bir yıl içinde tükettikleri buhar miktarına göre tespit edilmektedir.

Bir buhar dağıtım hattı için, mesafelere ve debiye göre, izin verilen 0,5 bar basınç farklıyla buhar taşıyabilecekleri gerekli çaplara ve birim maliyetlere göre alabilecekleri toplam maliyetlerini gösteren tablo, Çizelge 5.19' da verilmiştir.

5.4.1 Kojenerasyon Santralinin buhar üretim şartları

Basınç	:	10 barG Doymuş Buhar
Sıcaklık	:	184.1 °C
Ortalama Üretim Miktarı	:	30 t/h

5.4.2 Müşteri Ortalama Tüketim Şartları

Basınç	:	6 barG Doymuş Buhar
Sıcaklık	:	165 °C
Ortalama Üretim Miktarı	:	16,68 t/h

OSB içinde dağıtım yapılan müşterilere, iki ana hat üzerinden dağıtım yapılmakta olup bu her iki hattın toplam uzunlukları ve hatların başlangıç noktalarının taşıma kapasiteleri aşağıdaki çizelgedir.

Çizelge 5.16 Mevcut Müşteri Buhar Hatları Dağıtım Metraj ve Debileri

Dağıtım Hattı	Müşteri Sayısı	Buhar Tüketimleri Toplamı (t/h)	Dağıtım Hattı Toplam Uzunluğu (m)
OSB1	2	3,82	160
OSB2	21	12,86	4,351
Tüm Hat	23	16,68	4,511

OSB1 ve OSB2 hattı müşterileri Toplam Buhar Tüketimi 16.68 t/h, müşteri sayısı 23 ve toplam metrajı 4,511 m' dir.

Çizelge 5.17 OSB1 hattı Müşterileri ve kapasiteleri

SIRA NO	MÜŞTERİ ADI	Q (t/h)
1	BİRLİK YÜN	3,50
2	DÜLGEROĞLU	0,32
TOPLAM		3,82

Çizelge 5.18 OSB2 hattı Müşterileri ve kapasiteleri

SIRA NO	MÜŞTERİ ADI	Q (t/h)
1	ARAN MENSUCAT 2	0,50
2	SARAR BATTANİYE	0,60
3	UŞAK YÜNTEKS 1	0,65
4	KANDEMİROĞLU	0,06
5	DERCO	0,30
6	NOMAD HALICILIK	0,10
7	GÖRGÜLÜ TEKSTİL	0,50
8	AKSÜT	0,50
9	U. BESCİ (ÜÇYILDIZ)	0,40
10	NORM YÜN	1,00
11	KUNTDOKUR	0,70
12	VEFA TEKSTİL	0,20
13	UGİAD	0,15
14	KUYUCAK TEKSTİL	0,35
15	AKEL	1,00
16	YÜNTEKS 2	1,60
17	ER MENSUCAT	0,80
18	EREN TEKSTİL	1,50
19	BOZOĞLU TEKSTİL 2	0,60
20	KUNTER	0,80
21	USAŞ PREFABRİK	0,55
TOPLAM		12,86

5.4.3 OSB de Bulunan Müşteri Dağıtım Hatlarının Modellenmesi

Bu hatlar üzerinde olan müşterilerin her biri, optimizasyon tekniklerine göre kolayca incelenebilmek için belirli harfler ile isimlendirilmiş ve network analizlerinin yapılabilmesi için her biri birer kuyu olarak kabul edilmiştir. Aşağıda, OSB üzerinde belirli konumlarda ve kapasitelerde olan bu müşteriler için verilen kuyu isimleri verilmiştir. Bu durumda kaynak santraldir.

Çizelge 5.19 OSB1 hattı Müşterileri ve kapasiteleri

SIRA NO	MÜŞTERİ ADI	Q (t/h)	Kuyu Adı
*1	BİRLİK YÜN	3,50	A
*2	DÜLGEROĞLU	0,32	A
3	ARAN MENSUCAT 2	0,50	B
4	SARAR BATTANIYE	0,60	C
5	UŞAK YÜNTEKS 1	0,65	D
*6	KANDEMİROĞLU	0,06	F
*7	DERCO	0,30	F
*8	NOMAD HALICILIK	0,10	E
*9	GÖRGÜLÜ TEKSTİL	0,50	E
*10	AKSÜT	0,50	E
*11	U. BESCİ (ÜÇYILDIZ)	0,40	H
*12	NORM YÜN	1,00	H
*13	KUNTDOKUR	0,70	G
*14	VEFA TEKSTİL	0,20	G
15	UGİAD	0,15	I
16	KUYUCAK TEKSTİL	0,35	J
17	AKEL	1,00	K
18	YÜNTEKS 2	1,60	L
19	ER MENSUCAT	0,80	M
20	EREN TEKSTİL	1,50	N
21	BOZOĞLU TEKSTİL 2	0,60	O
22	KUNTER	0,80	O
23	USAŞ PREFABRİK	0,55	P

Açıklamalar *

Açıklamalar*:

Birlik Yün ve Dülgeroğlu buhar giriş noktaları aynı noktada olduğu için ikisi birlikte ele

-
- İlgili Açıklamalar bir sonraki sayfada belirtilmiştir.

alınarak Toplam 3,82 t/h tüketimde bir müşteri olarak değerlendirilmektedir. (A)

Nomad, Görgülü, Aksüt buhar giriş noktaları aynı noktada olduğu için ikisi birlikte ele alınarak Toplam 1,1 t/h tüketimde bir müşteri olarak değerlendirilmektedir. (E)

Norm Yün ve U.Besci (Üç Yıldız) buhar giriş noktaları aynı noktada olduğu için ikisi birlikte ele alınarak Toplam 1,4 t/h tüketimde bir müşteri olarak değerlendirilmektedir. (H)

Vefa Tekstil ve Kuntdokur buhar giriş noktaları aynı noktada olduğu için ikisi birlikte ele alınarak Toplam 0,9 t/h tüketimde bir müşteri olarak değerlendirilmektedir.(G)

Kandemiroğlu ve Derco buhar giriş noktaları aynı noktada olduğu için ikisi birlikte ele alınarak Toplam 0,36 t/h tüketimde bir müşteri olarak değerlendirilmektedir. (F)

Buna göre birleştirilmiş olan müşteri kapasiteleri ile, bu kaynak noktaları birer müşteri olarak değerlendirilmektedir.

Müşterilerin Organize Sanayi Bölgesindeki konumları ve (branşmanları) buhar giriş noktaları genel yerleşim planında (Şekil 5.7) görülmektedir. Ayrıca bazı müşterilerin olası giriş noktalarının birden farklı olması dağıtım hattında farklı olasılık ve kombinasyonları getirmektedir. Birden farklı noktalardan bağlantı yapılabilecek olan müşteri branşmanlarının listesi aşağıda olup genel yerleşim planında da verilmektedir.

Müşterilerin farklı noktalardan bağlantı yapılabilmesinin nedeni fabrika yerleşimlerinin ve tesisin buna izin veren noktalarına göre belirlenmiştir.

Farklı noktalardan bağlantı yapılabilecek olan ve birleştirilmiş bir hat üzerinde bulunan müşteriler ve bunların tanımlanmış olduğu kuyu isimleri aşağıdadır, böylece (kuyu isimleri ve birleştirilmiş isimler ile) çözüm için kolaylık oluşturulmaktadır.

- D = Uşak Yünteks
- E = Nomad, Görgülü, Aksüt
- H= Norm Yün ve U.Besci (Üç Yıldız)
- G= Vefa Tekstil ve Kuntdokur

Diğer müşterilere farklı noktalardan giriş yapılamamasının nedeni tesis yerleşimlerinin, bu kısımdaki coğrafi yapının ve / veya fabrika sahiplerinin izin vermemesi dolayısıyladır.

Aşağıda oluşan network hattındaki kuyuların isimleri ve kapasiteleri özetlenerek verilmiştir:

Çizelge 5.20 Kuyu Noktaları (Müşterilere ait)

Kuyu Adı	Q (t/h)
A	3,82
B	0,5
C	0,6
D	0,65
E	1,1
F	0,36
G	0,9
H	1,4
I	0,15
J	0,35
K	1
L	1,6
M	0,8
N	1,5
O	1,4
P	0,55
TOPLAM	16,68

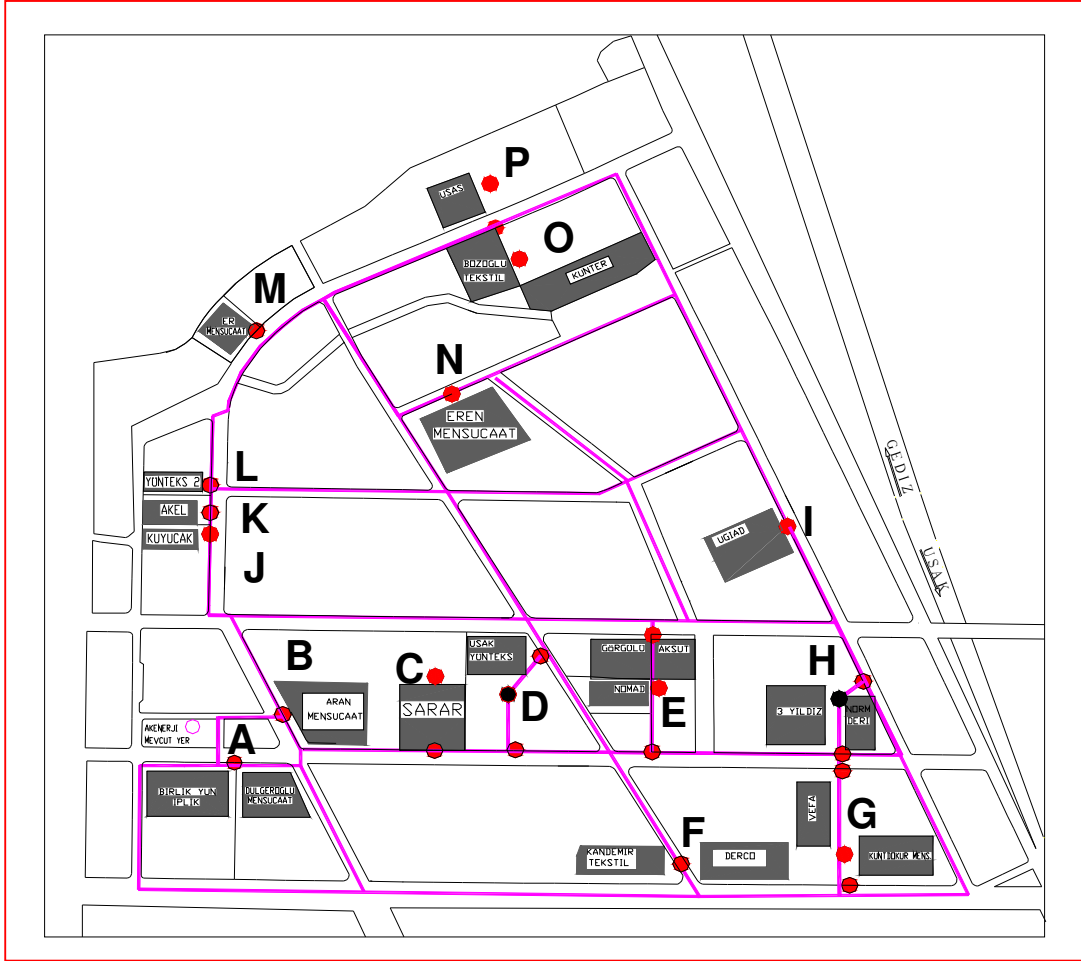
Uşak OSB’ nde yer alan müşterilerin konumları ve kapasiteleri ile bir network hattı genel Yerleşimi aşağıdaki şekilde görülmektedir. Network hattında birer arkın var olmasını sağlayan yollar (Şekilde Caddeler veya yollar olarak gösterilmiştir) şekilde açıkça görülmektedir.

5.4.3.1 Network Modelinin Oluşturması

Şekil 5.10 da verilen mnetwork modelinde kuyu kapasiteleri altı çizgili olarak gösterilmiştir.

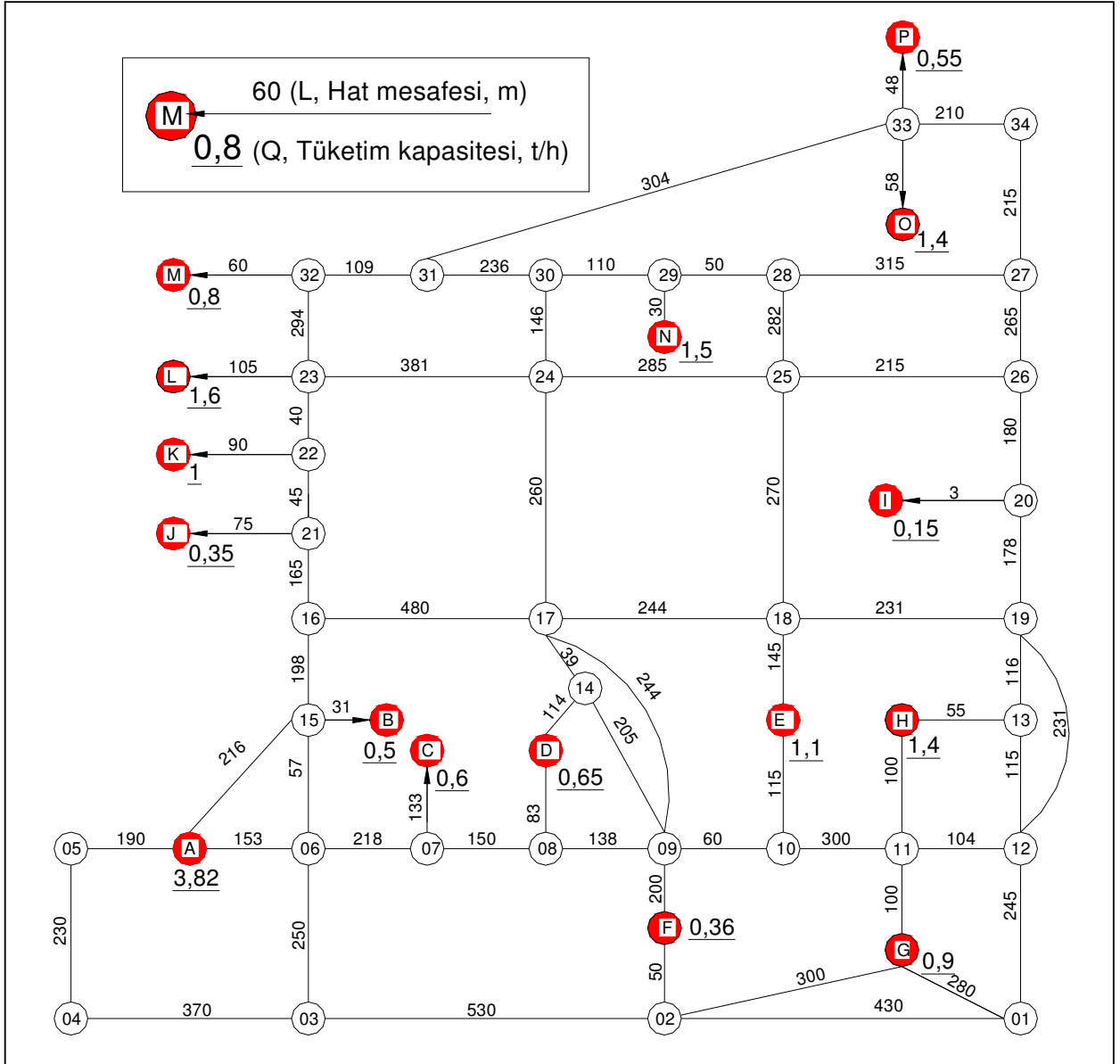
Arkların (yolların) uzunlukları metre olarak arkların üzerinde belirtilmiştir.

Böyle bir modelde, olası alternatifleri kapsayan arklar yönsüzdür. Yani her iki yönde de akış yapılabilir. Fakat alternatif olmayan yönlü olan arklar, tek yönlü oklar ile gösterilmiştir.



Şekil 5.9 Uşak OSB Müşterilerinin Genel Yerleşiminde olası bağlantı noktalarının gösterilmesi (network modellemesi için ön çalışma)

Diğer yuvarlar doğrudan tüketim yapan müşteriler olmayıp dağıtım hatları üzerinde bulunan olası tüketim noktalarıdır. Bu tanımlanmış noktalar olası dağıtım hattı üzerindeki ayırım noktaları, düğüm noktalarıdır. Çünkü her bir dağıtım hattı olasılığı, devamındaki müşteri (kuyu) kapasitelerinin toplamını verecek, her bir müşteriden (kuyu) veya ayırım noktasından sonra kapasite bu tüketim miktarı kadar düşecektir.



Şekil 5.10 Uşak OSB müşteri buhar dağıtımları için network modeli

Yukarıda resmedilen network modelinde, olası dağıtım hattı üzerinde tek alternatifli olan kuyulara (müşteriler) yönlü arklarla yapılan bağlantılar kolayca görülmektedir. Bu network'de sonuç kuyular olarak tanımlayabileceğimiz birleştirilmiş kuyular ile, diğer kuyular (gerçek tüketimi oluşturan müşteri noktaları) izleme kolaylığı için harfler ile betimlenmişleridir. Diğer tüm noktalar, rakamsal değerlerle belirlenmişlerdir.

Tüketime ait bu noktaları listeleyecek olursak;

- 1) Olası dağıtım hatları üzerinde ana dağıtım noktalarına tek yönlü (tek alternatifli bağlantısı olan) müşterilere ait kuyular:

a) B , C , I , J , K , L , M , N ,N , O , P ,

2) Ve olası dağıtım hatları üzerinde birden fazla bağlantı seçeneği bulunan müşterilere ait kuyular (yönsüz arklarla bağlanmışlardır) ise:

a) A , D , E , F , G , H ,

Olmaktadır.

Diğer kuyular da önem arz etmekle birlikte, sonuç olarak müşterilere ait kuyulara ulaşmak amacıyla olduğumuz için buradaki bağlantı noktalarından bahsettik. Daha önce de bahsettiğimiz gibi bu müşteriler için birleştirilmiş olan kuyu isimlerin aracılığı ile çözüm için kolaylık oluşturulmaktadır.

5.4.3.2 Uygun Optimizasyon Yönteminin Belirlenmesi

Dağıtım hattının toplam metrajının kısa olması yapılacak yatırım maliyetinde doğrudan etkili olmaktadır. Bu nedenle mevcut network hattında kaynak noktası belirli olmadan müşterilerin olduğu noktalardan geçen en kısa dağıtımın geçtiği yolu bulmak durumundayız.,

Bunun için çoğunlukla yönsüz arklar ile bağlanmış olan network'ü göz önüne alarak, network'ü geren ve dallarının uzunlukları toplamı minimum olan ağacı bulmamız gerekmektedir.

5. Bölümdeki optimizasyon yöntemleri incelendiğinde bu sistem için en uygun yöntem bölüm 5.9 da bahsedilen minimal yayılma problemleri yaklaşımı ile yapılacak bir çözümün en uygun yöntem olduğu görülmektedir. Bu çalışmada bahsedilen ve bu çalışmanın dışındaki çeşitli lineer programlama teknikleri ve optimizasyon yöntemleri ile uygulanan denemelerde optimizasyonun yapılabilmesi için en uygun yöntemin “5.9 Minimal Yayılma Problemleri” başlığı altında anlatılan prosedürlere göre yapılacak bir çalışma ile çözüme ulaşılabileceği belirlenmiştir. Bu nedenle optimizasyon için başarısız olan diğer yöntemler ve bunlarla yapılan çalışmalar burada bahsedilmeyecektir.

Minimal Yayılma Problemi çözüm tekniği ile network'ü geren en kısa ağaç bulunacaktır. Böylece yüzlerce olasılık arasında, müşteriler (kuyular) arasında olabilecek en kısa güzergah tespit edilecektir. Fakat en kısa güzergahın belirlenmesi optimizasyonun sonuçlanması için gerek fakat yeter şart olmamaktadır. Bu en kısa borulama ile gerçekleştirilecek olan güzergah üzerinde kaynak noktası (santral yeri) henüz tespit edilmemiştir.

Kaynak noktasının konumu, birleştirilmiş müşteri kapasitelerinden dolayı büyük önem arz etmektedir. Bu ağaç üzerinde her kuyu noktası, kaynak noktası için bir çözüm olasılığıdır. En

kısa borulama güzergahını oluşturan çözüm, olasılıkları azaltmakta fakat yine birçok düğüm noktasında (kuyuda) olabilecek kaynak noktası, onlarca olasılığı beraberinde getirmektedir. Kaynağın her olası konumu müşteri (kuyu) kapasitelerinin toplamını

5.4.3.3 Optimizasyon için yöntemler

Ark uzunlukları negatif olmayacaktır. Ayrıca yönsüz oldukları için tüm arklar da $d_{ij} = d_{ji}$ olmaktadır.

Bu network'de başlangıç noktasını keyfi olarak seçebiliriz. Seçilen bu başlangıç noktası ağacın ilk elemanını oluşturmaktadır. Bölüm 5.9 da anlatılan minimal yayılma algoritmasını uygulayalım.

Ağacın Noktalar kümesi Y ve ağaç dışındaki noktalar kümesi $\hat{Y}$ olsun.

Her adımda $N_i \in Y$ ve $N_j \in \hat{Y}$ için $\min_{i,j} d_{ij} = d_{pr}$ uzunluğundaki A_{pr} arkı ağaca dahil edilir., Yeni durumda,

$$\hat{Y} = Y \cup \{N_r\} \quad \text{ve} \quad \bar{Y} = \bar{Y} \setminus \{N_r\}$$

Olur. Bu işlem $\bar{Y} = \emptyset$ oluncaya dek devam edecektir. Son durumda bulunan ağaç minimal yayılmayı sağlayacaktır. Burada dikkat edilmesi gereken nokta, arklar ile tüm müşterilere ulaşımın sağlanması durumunda $\bar{Y} = \emptyset$ olarak minimal yayılma şartlarının gerçekleştiğinin görülmesidir. Yani;

$$\bar{Y} \not\subset \{A, B, C, D, E, F, G, H, I, J, K, L, M, N, O, P\} \Rightarrow \bar{Y} = \emptyset$$

Olmaktadır.

Çalışmamız için hazırlamış olduğumuz network'de, müşterilerden (kuyu noktalarından) geçen her nokta için sırası ile seçim yapalım. Buradaki seçim noktamız Buhar dağıtımı yapacak olan santralin yerini doğrudan belirlememekle birlikte en kısa ağacı verecek, böylece santralin yerleşiminin yapılacağı hat boyu hakkında bir birincil olarak fikir verecektir.

Network'de en kısa ağacın oluşması santralin yer optimizasyonu için önemlidir. Çünkü boru dağıtım hatlarının maliyetini belirleyen boru çapı (D_o), tüketim noktaları arasındaki uzaklık (L_p) ile kuyuların tüketim miktarının (Q) bir fonksiyonudur. Aşağıdaki eşitlikleri hatırlayalım;

$$D_o = f(Q, L_p) \text{ (mm)} \quad (5.12)$$

İdi. Her i noktasından j noktasına giden bir ark/hat boyunca ($c=\text{constant}$ olmak üzere);

Ayrıca tüketim gereksinimi olan ve her i noktasından j noktasına giden bir ark/hat boyunca tüketim miktarını karşılayacak olan boru çapının minimum olması aşağıdaki şartlara bağlıdır;

$$Q_{i,j}=c \Rightarrow \min D_{o,i,j}=f(Q, \min_{i,j}, L_p) \quad (5.34)$$

$$L_{p,i,j}=c \Rightarrow \min D_{o,i,j}=f(\min Q_{i,j}, L_p) \quad (5.35)$$

Müşterilerin tüketim miktarları sabit kalmakla birlikte olası her bir alternatif güzergah ve kaynak noktasının da değişken bir konumda olması neticesinde, hat boyunca olan tüketim miktarları da değişken olmaktadır. Bu kısım ise bölüm 4.10 da bahsi geçen Minimum Potansiyel Farkı Prosedürlerine göre çözülebilecektir.

Şekil 5.9 da verilen network hattında minimum ağacı bulmak üzere N_{01} noktasından çözüme başlayacağız;

Başlangıç noktası N_{01} seçelim,

1. $Y=\{N_{01}\}$ ve

$\hat{Y} = \{ N_{02}, N_{03}, N_{04}, N_{05}, N_{06}, N_{07}, N_{08}, N_{09}, N_{10}, N_{11}, N_{12}, N_{13}, N_{14}, N_{15}, N_{16}, N_{17}, N_{18}, N_{19}, N_{20}, N_{21}, N_{22}, N_{23}, N_{24}, N_{25}, N_{26}, N_{27}, N_{28}, N_{29}, N_{30}, N_{31}, N_{32}, N_{33}, N_{34}, N_A, N_B, N_C, N_D, N_E, N_F, N_G, N_H, N_I, N_J, N_K, N_L, N_M, N_N, N_O, N_P \}$

Olmaktadır.

Buradan itibaren N_{01} 'e en (245 m ile) küçük bağlantılı en kısa A_{01-12} arkı ağacı arka katılır. Şimdi

2. $Y=\{ N_{01}, N_{12} \}$ ve

$\hat{Y} = \{ N_{02}, N_{03}, N_{04}, N_{05}, N_{06}, N_{07}, N_{08}, N_{09}, N_{10}, N_{11}, N_{13}, N_{14}, N_{15}, N_{16}, N_{17}, N_{18}, N_{19}, N_{20}, N_{21}, N_{22}, N_{23}, N_{24}, N_{25}, N_{26}, N_{27}, N_{28}, N_{29}, N_{30}, N_{31}, N_{32}, N_{33}, N_{34}, N_A, N_B, N_C, N_D, N_E, N_F, N_G, N_H, N_I, N_J, N_K, N_L, N_M, N_N, N_O, N_P \}$

Olmuştur ve $\{N_{12}\}$ $\hat{Y}$ kümesinden ayrılmıştır. (Aynı zamanda,

$$\hat{Y} \subset \{A, B, C, D, E, F, G, H, I, J, K, L, M, N, O, P\} \Rightarrow Y \neq \emptyset$$

Durumu görülmektedir. Aşağıda prosedür gereği, yukarıdaki şart sağlanma durumu oldukça her adımda yapılan işlemler benzeri biçimde devam edecek,

$Y \not\subset \{A, B, C, D, E, F, G, H, I, J, K, L, M, N, O, P\} \Rightarrow Y = \emptyset$ şartı sağlandığında ise arklar toplamı minimum olan ağaç bulunarak prosedür sona erecektir. Her adımda yapılan işlemleri kalabalıklaştırmamak için sadece burada bahsetmeyi uygun gördük.)

İşleme devam edecek olursak, Y ye bağlantılı ve ağaç dışındaki arkların en küçüğü $A_{12, 11}$ (104 m ile) ağaca katıldığını görürüz. Yeni durumda,

3. $Y = \{N_{01}, N_{12}, N_{11}\}$ ve

$\hat{Y} = \{N_{02}, N_{03}, N_{04}, N_{05}, N_{06}, N_{07}, N_{08}, N_{09}, N_{10}, N_{13}, N_{14}, N_{15}, N_{16}, N_{17}, N_{18}, N_{19}, N_{20}, N_{21}, N_{22}, N_{23}, N_{24}, N_{25}, N_{26}, N_{27}, N_{28}, N_{29}, N_{30}, N_{31}, N_{32}, N_{33}, N_{34}, N_A, N_B, N_C, N_D, N_E, N_F, N_G, N_H, N_I, N_J, N_K, N_L, N_M, N_N, N_O, N_P\}$

Olur ve $\{N_{11}\}$ $\hat{Y}$ kümesinden ayrılmıştır. Y ye bağlantılı ve ağaç dışındaki arkların en küçüğü $A_{11, H}$ ve $A_{11, G}$ dir ve $A_{11, H} = A_{11, G}$ dir. Ayrıca N_G ve N_H müşteridir ve her ikisi de N_{11} ' e bağlı en küçük arktır. Bu noktada sırasıyla her ikisi de ağaca dahil olur. ($A_{11, H} = A_{11, G} = 100$ m ile) Buna göre $A_{11, G}$ arkı ağaca katılır,

4. $Y = \{N_{01}, N_{12}, N_{11}, N_G\}$ ve

$\hat{Y} = \{N_{02}, N_{03}, N_{04}, N_{05}, N_{06}, N_{07}, N_{08}, N_{09}, N_{10}, N_{13}, N_{14}, N_{15}, N_{16}, N_{17}, N_{18}, N_{19}, N_{20}, N_{21}, N_{22}, N_{23}, N_{24}, N_{25}, N_{26}, N_{27}, N_{28}, N_{29}, N_{30}, N_{31}, N_{32}, N_{33}, N_{34}, N_A, N_B, N_C, N_D, N_E, N_F, N_H, N_I, N_J, N_K, N_L, N_M, N_N, N_O, N_P\}$

dir. $\{N_G\}$ $\hat{Y}$ kümesinden ayrılır ve Y ye bağlantılı en kısa ark $A_{11, H}$ ağaca katılır,

5. $Y = \{N_{01}, N_{12}, N_{11}, N_G, N_H\}$ ve

$\hat{Y} = \{N_{02}, N_{03}, N_{04}, N_{05}, N_{06}, N_{07}, N_{08}, N_{09}, N_{10}, N_{13}, N_{14}, N_{15}, N_{16}, N_{17}, N_{18}, N_{19}, N_{20}, N_{21}, N_{22}, N_{23}, N_{24}, N_{25}, N_{26}, N_{27}, N_{28}, N_{29}, N_{30}, N_{31}, N_{32}, N_{33}, N_{34}, N_A, N_B, N_C, N_D, N_E, N_F, N_I, N_J, N_K, N_L, N_M, N_N, N_O, N_P\}$

dir. $\{N_H\}$ $\hat{Y}$ kümesinden ayrılmıştır. Buradan Y ye bağlantılı ve ağaç dışındaki arkların en küçüğü $A_{H, 13}$ (45 m ile) ağaca dahil olur. Yeni durumda,

6. $Y = \{N_{01}, N_{12}, N_{11}, N_G, N_H, N_{13}\}$ ve

$\hat{Y} = \{N_{02}, N_{03}, N_{04}, N_{05}, N_{06}, N_{07}, N_{08}, N_{09}, N_{10}, N_{14}, N_{15}, N_{16}, N_{17}, N_{18}, N_{19}, N_{20}, N_{21}, N_{22},$

$N_{23}, N_{24}, N_{25}, N_{26}, N_{27}, N_{28}, N_{29}, N_{30}, N_{31}, N_{32}, N_{33}, N_{34}, N_A, N_B, N_C, N_D, N_E, N_F, N_I, N_J, N_K, N_L, N_M, N_N, N_O, N_P \}$

dir. $\{N_{13}\}$ $\hat{Y}$ kümesinden ayrılmıştır. Buradan Y ye bağlantılı ve ağaç dışındaki arkların en küçüğü $A_{13, 19}$ (116 m ile) ağaca dahil olur. Yeni durumda,

7. $Y = \{ N_{01}, N_{12}, N_{11}, N_G, N_H, N_{13}, N_{19} \}$ ve

$\hat{Y} = \{ N_{02}, N_{03}, N_{04}, N_{05}, N_{06}, N_{07}, N_{08}, N_{09}, N_{10}, N_{14}, N_{15}, N_{16}, N_{17}, N_{18}, N_{20}, N_{21}, N_{22}, N_{23}, N_{24}, N_{25}, N_{26}, N_{27}, N_{28}, N_{29}, N_{30}, N_{31}, N_{32}, N_{33}, N_{34}, N_A, N_B, N_C, N_D, N_E, N_F, N_I, N_J, N_K, N_L, N_M, N_N, N_O, N_P \}$

dir. $\{N_{19}\}$ $\hat{Y}$ kümesinden ayrılmıştır. Buradan Y ye bağlantılı ve ağaç dışındaki arkların en küçüğü $A_{19, 20}$ (178 m ile) ağaca dahil olur. Yeni durumda,

8. $Y = \{ N_{01}, N_{12}, N_{11}, N_G, N_H, N_{13}, N_{19}, N_{20} \}$ ve

$\hat{Y} = \{ N_{02}, N_{03}, N_{04}, N_{05}, N_{06}, N_{07}, N_{08}, N_{09}, N_{10}, N_{14}, N_{15}, N_{16}, N_{17}, N_{18}, N_{21}, N_{22}, N_{23}, N_{24}, N_{25}, N_{26}, N_{27}, N_{28}, N_{29}, N_{30}, N_{31}, N_{32}, N_{33}, N_{34}, N_A, N_B, N_C, N_D, N_E, N_F, N_I, N_J, N_K, N_L, N_M, N_N, N_O, N_P \}$

dir. $\{N_{20}\}$ $\hat{Y}$ kümesinden ayrılmıştır. Buradan Y ye bağlantılı ve ağaç dışındaki arkların en küçüğü $A_{20, 1}$ (3 m ile) ağaca dahil olur. Yeni durumda,

9. $Y = \{ N_{01}, N_{12}, N_{11}, N_G, N_H, N_{13}, N_{19}, N_{20}, N_I \}$ ve

$\hat{Y} = \{ N_{02}, N_{03}, N_{04}, N_{05}, N_{06}, N_{07}, N_{08}, N_{09}, N_{10}, N_{14}, N_{15}, N_{16}, N_{17}, N_{18}, N_{21}, N_{22}, N_{23}, N_{24}, N_{25}, N_{26}, N_{27}, N_{28}, N_{29}, N_{30}, N_{31}, N_{32}, N_{33}, N_{34}, N_A, N_B, N_C, N_D, N_E, N_F, N_J, N_K, N_L, N_M, N_N, N_O, N_P \}$

dir. $\{N_I\}$ $\hat{Y}$ kümesinden ayrılmıştır. N_I kuyusu müşteridir.

Buradan Y ye bağlantılı ve ağaç dışındaki arkların en küçüğü $A_{20, 26}$ (180 m ile) olmakla birlikte, bu N_{20} noktasının, sonuç itibarıyla N_O ve N_P kuyularına bağlanacağı N_{33} kuyusuna olan yol mesafe toplamının $\{ N_{20}, N_{26}, N_{27}, N_{34}, N_{33} \}$ veya yine N_{20} ye yakın diğer bir müşteri teşkil eden, N_N kuyusuna olan toplam yol mesafesinin $\{ N_{20}, N_{26}, N_{25}, N_{28}, N_{29}, N_N \}$ oluşan ağaç içinde minimum arklar toplamını oluşturmaması nedeniyle dahil edilememektedir. Çünkü bu arkların oluşan ağaç içinde başka bir müşteri teşkil eden kuyu ile bağlantıları yoktur ve arklar toplamı olan bu alt ağaç, tek bir ark oluşturmaktadır, sonuç olarak toplam ark mesafesi mevcut Y ağacı içinde en küçük ark mesafesini oluşturmamaktadır:

{ $N_{20}, N_{26}, N_{27}, N_{34}, N_{33}$ } zinciri bir yol oluşturmakta ve $A_{20, 26}, A_{26, 27}, A_{27, 34}, A_{34, 33}$ arkları toplam mesafesi = $(180+265+215+210)=870'$ dir.

Benzeri biçimde N_I, N_N arası minimum arkların toplamının da mevcut Y ağacı ile bağlantılı olan arklar arasında minimumu olmadığı görülmektedir.

Bu durumda Y ye bağlantılı ve ağaç dışındaki arkların en küçüğü $A_{19, 18}$ (231 m ile) ağaca dahil olur. Yeni durumda,

10. $Y=\{ N_{01}, N_{12}, N_{11}, N_G, N_H, N_{13}, N_{19}, N_{20}, N_I, N_{18} \}$ ve

$\hat{Y} = \{ N_{02}, N_{03}, N_{04}, N_{05}, N_{06}, N_{07}, N_{08}, N_{09}, N_{10}, N_{14}, N_{15}, N_{16}, N_{17}, N_{21}, N_{22}, N_{23}, N_{24}, N_{25}, N_{26}, N_{27}, N_{28}, N_{29}, N_{30}, N_{31}, N_{32}, N_{33}, N_{34}, N_A, N_B, N_C, N_D, N_E, N_F, N_J, N_K, N_L, N_M, N_N, N_O, N_P \}$

dir. $\{N_{18}\}$ $\hat{Y}$ kümesinden ayrılmıştır. Buradan Y ye bağlantılı ve ağaç dışındaki arkların en küçüğü $A_{18, E}$ (145 m ile) ağaca dahil olur. Yeni durumda,

11. $Y=\{ N_{01}, N_{12}, N_{11}, N_G, N_H, N_{13}, N_{19}, N_{20}, N_I, N_{18}, N_E \}$ ve

$\hat{Y} = \{ N_{02}, N_{03}, N_{04}, N_{05}, N_{06}, N_{07}, N_{08}, N_{09}, N_{10}, N_{14}, N_{15}, N_{16}, N_{17}, N_{21}, N_{22}, N_{23}, N_{24}, N_{25}, N_{26}, N_{27}, N_{28}, N_{29}, N_{30}, N_{31}, N_{32}, N_{33}, N_{34}, N_A, N_B, N_C, N_D, N_F, N_J, N_K, N_L, N_M, N_N, N_O, N_P \}$

dir. $\{N_E\}$ $\hat{Y}$ kümesinden ayrılmıştır. $\{N_E\}$ müşteri noktasıdır. Buradan Y ye bağlantılı ve ağaç dışındaki arkların en küçüğü $A_{E,10}$ (115 m ile) ağaca dahil olur. Yeni durumda,

12. $Y=\{ N_{01}, N_{12}, N_{11}, N_G, N_H, N_{13}, N_{19}, N_{20}, N_I, N_{18}, N_E, N_{10} \}$ ve

$\hat{Y} = \{ N_{02}, N_{03}, N_{04}, N_{05}, N_{06}, N_{07}, N_{08}, N_{09}, N_{14}, N_{15}, N_{16}, N_{17}, N_{21}, N_{22}, N_{23}, N_{24}, N_{25}, N_{26}, N_{27}, N_{28}, N_{29}, N_{30}, N_{31}, N_{32}, N_{33}, N_{34}, N_A, N_B, N_C, N_D, N_F, N_J, N_K, N_L, N_M, N_N, N_O, N_P \}$

dir. $\{N_{10}\}$ $\hat{Y}$ kümesinden ayrılmıştır. Buradan Y ye bağlantılı ve ağaç dışındaki arkların en küçüğü $A_{10, 09}$ (60 m ile) ağaca dahil olur. Yeni durumda,

13. $Y=\{ N_{01}, N_{12}, N_{11}, N_G, N_H, N_{13}, N_{19}, N_{20}, N_I, N_{18}, N_E, N_{10}, N_{09} \}$ ve

$\hat{Y} = \{ N_{02}, N_{03}, N_{04}, N_{05}, N_{06}, N_{07}, N_{08}, N_{14}, N_{15}, N_{16}, N_{17}, N_{21}, N_{22}, N_{23}, N_{24}, N_{25}, N_{26}, N_{27}, N_{28}, N_{29}, N_{30}, N_{31}, N_{32}, N_{33}, N_{34}, N_A, N_B, N_C, N_D, N_F, N_J, N_K, N_L, N_M, N_N, N_O, N_P \}$

dir. $\{N_{09}\}$ $\hat{Y}$ kümesinden ayrılmıştır. Buradan Y ye bağlantılı ve ağaç dışındaki arkların en küçüğü $A_{09, 08}$ (138 m ile) ağaca dahil olur. Yeni durumda,

14. $Y=\{ N_{01}, N_{12}, N_{11}, N_G, N_H, N_{13}, N_{19}, N_{20}, N_I, N_{18}, N_E, N_{10}, N_{09}, N_{08} \}$ ve

$$\hat{Y} = \{ N_{02}, N_{03}, N_{04}, N_{05}, N_{06}, N_{07}, N_{14}, N_{15}, N_{16}, N_{17}, N_{21}, N_{22}, N_{23}, N_{24}, N_{25}, N_{26}, N_{27}, N_{28}, N_{29}, N_{30}, N_{31}, N_{32}, N_{33}, N_{34}, N_A, N_B, N_C, N_D, N_E, N_J, N_K, N_L, N_M, N_N, N_O, N_P \}$$

dir. $\{N_{08}\}$ $\hat{Y}$ kümesinden ayrılmıştır. Buradan Y ye bağlantılı ve ağaç dışındaki arkların en küçüğü $A_{08,D}$ (83 m ile) ağaca dahil olur. Yeni durumda,

$$15. Y = \{ N_{01}, N_{12}, N_{11}, N_G, N_H, N_{13}, N_{19}, N_{20}, N_I, N_{18}, N_E, N_{10}, N_{09}, N_{08}, N_D \} \text{ ve}$$

$$\hat{Y} = \{ N_{02}, N_{03}, N_{04}, N_{05}, N_{06}, N_{07}, N_{14}, N_{15}, N_{16}, N_{17}, N_{21}, N_{22}, N_{23}, N_{24}, N_{25}, N_{26}, N_{27}, N_{28}, N_{29}, N_{30}, N_{31}, N_{32}, N_{33}, N_{34}, N_A, N_B, N_C, N_F, N_J, N_K, N_L, N_M, N_N, N_O, N_P \}$$

dir. $\{N_D\}$ $\hat{Y}$ kümesinden ayrılmıştır. N_D müşteridir. Buradan Y ye bağlantılı ve ağaç dışındaki arkların en küçüğü $A_{D,14}$ olmakla birlikte herhangi bir müşteri ile ilgili kısa yola dahil olmadığı görüldüğünden ağaca dahil edilmez. Aynı şekilde, 9. Adımda yapılan eşleştirmelerin benzerinin burada da yapılması durumunda oluşan arklar toplamının, minimum ark şartını sağlamadığı görülür. Bu durumda mevcut Y ağacındaki arkların en küçüğü $A_{08,07}$ dir. (150m ile) Yeni durumda,

$$16. Y = \{ N_{01}, N_{12}, N_{11}, N_G, N_H, N_{13}, N_{19}, N_{20}, N_I, N_{18}, N_E, N_{10}, N_{09}, N_{08}, N_D, N_{07} \} \text{ ve}$$

$$\hat{Y} = \{ N_{02}, N_{03}, N_{04}, N_{05}, N_{06}, N_{14}, N_{15}, N_{16}, N_{17}, N_{21}, N_{22}, N_{23}, N_{24}, N_{25}, N_{26}, N_{27}, N_{28}, N_{29}, N_{30}, N_{31}, N_{32}, N_{33}, N_{34}, N_A, N_B, N_C, N_F, N_J, N_K, N_L, N_M, N_N, N_O, N_P \}$$

olur. $\{N_{07}\}$ $\hat{Y}$ kümesinden ayrılmıştır. Y ye bağlantılı ve ağaç dışındaki arkların en küçüğü $A_{07,C}$ (133 m ile) ağaca dahil olur. $A_{07,C}$ arkı tek yönlü olmakla beraber, müşteriye giden son mecburi hat olması ve her olasılıkta değerlendirilme durumunda olduğu için, dahil edilmiştir.

Yeni durumda,

$$17. Y = \{ N_{01}, N_{12}, N_{11}, N_G, N_H, N_{13}, N_{19}, N_{20}, N_I, N_{18}, N_E, N_{10}, N_{09}, N_{08}, N_D, N_{07}, N_C \} \text{ ve}$$

$$\hat{Y} = \{ N_{02}, N_{03}, N_{04}, N_{05}, N_{06}, N_{14}, N_{15}, N_{16}, N_{17}, N_{21}, N_{22}, N_{23}, N_{24}, N_{25}, N_{26}, N_{27}, N_{28}, N_{29}, N_{30}, N_{31}, N_{32}, N_{33}, N_{34}, N_A, N_B, N_F, N_J, N_K, N_L, N_M, N_N, N_O, N_P \}$$

olur. $\{N_C\}$ $\hat{Y}$ kümesinden ayrılmıştır. Y ye bağlantılı ve ağaç dışındaki arkların en küçüğü $A_{09,F}$ (200 m ile) ağaca dahil olur. Yeni durumda,

$$18. Y = \{ N_{01}, N_{12}, N_{11}, N_G, N_H, N_{13}, N_{19}, N_{20}, N_I, N_{18}, N_E, N_{10}, N_{09}, N_{08}, N_D, N_{07}, N_C, N_F \} \text{ ve}$$

$$\hat{Y} = \{ N_{02}, N_{03}, N_{04}, N_{05}, N_{06}, N_{14}, N_{15}, N_{16}, N_{17}, N_{21}, N_{22}, N_{23}, N_{24}, N_{25}, N_{26}, N_{27}, N_{28}, N_{29}, N_{30}, N_{31}, N_{32}, N_{33}, N_{34}, N_A, N_B, N_J, N_K, N_L, N_M, N_N, N_O, N_P \}$$

olur. $\{N_F\}$ $\hat{Y}$ kümesinden ayrılmıştır. N_F müşteridir. Buradan Y ye bağlantılı ve ağaç dışındaki arkların en küçüğü $A_{F, 02}$ olmakla birlikte herhangi bir müşteri ile ilgili kısa yola dahil olmadığı, dahil edilmesi durumunda hali hazırda ulaşılmış olan kuyulara (müşteri) mükerreren dahil olacağı görüldüğünden ağaca dahil edilmez. Aynı şekilde, 9. adımda yapılan eşleştirmelerin benzerinin burada da yapılması durumunda oluşan arklar toplamının, minimum ark şartını sağlamadığı görülür. Bu durumda mevcut Y ağacındaki arkların en küçüğü $A_{07, 06}$ dır. (218m ile) Yeni durumda,

19. $Y=\{ N_{01}, N_{12}, N_{11}, N_G, N_H, N_{13}, N_{19}, N_{20}, N_I, N_{18}, N_E, N_{10}, N_{09}, N_{08}, N_D, N_{07}, N_C, N_F, N_{06} \}$
ve

$\hat{Y}= \{ N_{02}, N_{03}, N_{04}, N_{05}, N_{14}, N_{15}, N_{16}, N_{17}, N_{21}, N_{22}, N_{23}, N_{24}, N_{25}, N_{26}, N_{27}, N_{28}, N_{29}, N_{30}, N_{31}, N_{32}, N_{33}, N_{34}, N_A, N_B, N_J, N_K, N_L, N_M, N_N, N_O, N_P \}$

$\{N_{06}\}$ $\hat{Y}$ kümesinden ayrılmıştır. Y ye bağlantılı ve ağaç dışındaki arkların en küçüğü $A_{06, 15}$ (57 m ile) ağaca dahil olur. Yeni durumda,

20. $Y=\{ N_{01}, N_{12}, N_{11}, N_G, N_H, N_{13}, N_{19}, N_{20}, N_I, N_{18}, N_E, N_{10}, N_{09}, N_{08}, N_D, N_{07}, N_C, N_F, N_{06}, N_{15} \}$ ve

$\hat{Y}= \{ N_{02}, N_{03}, N_{04}, N_{05}, N_{14}, N_{16}, N_{17}, N_{21}, N_{22}, N_{23}, N_{24}, N_{25}, N_{26}, N_{27}, N_{28}, N_{29}, N_{30}, N_{31}, N_{32}, N_{33}, N_{34}, N_A, N_B, N_J, N_K, N_L, N_M, N_N, N_O, N_P \}$

$\{N_{15}\}$ $\hat{Y}$ kümesinden ayrılmıştır. Y ye bağlantılı ve ağaç dışındaki arkların en küçüğü $A_{15, B}$ (31 m ile) ağaca dahil olur. $A_{15, B}$ arkı tek yönlü olmakla birlikte müşteriye giden son, mecburi hat olması nedeni ve her olasılıkta değerlendirilme durumunda olduğu için dahil edilmiştir. Yeni durumda,

21. $Y=\{ N_{01}, N_{12}, N_{11}, N_G, N_H, N_{13}, N_{19}, N_{20}, N_I, N_{18}, N_E, N_{10}, N_{09}, N_{08}, N_D, N_{07}, N_C, N_F, N_{06}, N_{15}, N_B \}$ ve

$\hat{Y}= \{ N_{02}, N_{03}, N_{04}, N_{05}, N_{14}, N_{16}, N_{17}, N_{21}, N_{22}, N_{23}, N_{24}, N_{25}, N_{26}, N_{27}, N_{28}, N_{29}, N_{30}, N_{31}, N_{32}, N_{33}, N_{34}, N_A, N_J, N_K, N_L, N_M, N_N, N_O, N_P \}$

$\{N_B\}$ $\hat{Y}$ kümesinden ayrılmıştır. N_B müşteridir. Y ye bağlantılı ve ağaç dışındaki arkların en küçüğü $A_{06, A}$ (153 m ile) ağaca dahil olur. Yeni durumda,

22. $Y=\{ N_{01}, N_{12}, N_{11}, N_G, N_H, N_{13}, N_{19}, N_{20}, N_I, N_{18}, N_E, N_{10}, N_{09}, N_{08}, N_D, N_{07}, N_C, N_F, N_{06}, N_{15}, N_B, N_A \}$ ve

$\hat{Y} = \{ N_{02}, N_{03}, N_{04}, N_{05}, N_{14}, N_{16}, N_{17}, N_{21}, N_{22}, N_{23}, N_{24}, N_{25}, N_{26}, N_{27}, N_{28}, N_{29}, N_{30}, N_{31}, N_{32}, N_{33}, N_{34}, N_J, N_K, N_L, N_M, N_N, N_O, N_P \}$

$\{N_A\}$ $\hat{Y}$ kümesinden ayrılmıştır ve müşteridir. Y ye bağlantılı ve ağaç dışındaki arkların en küçüğü $A_{15, 16}$ (198 m ile) ağaca dahil olur. (N_A ile N_{05} arasında olan $A_{A,05}$ arki, herhangi bir tüketim yapan kuyu (müşteri) ile doğrudan bağlantı kuramamakta ve boşa çıkmaktadır)Yeni durumda,

23. $Y = \{ N_{01}, N_{12}, N_{11}, N_G, N_H, N_{13}, N_{19}, N_{20}, N_I, N_{18}, N_E, N_{10}, N_{09}, N_{08}, N_D, N_{07}, N_C, N_F, N_{06}, N_{15}, N_B, N_A, N_{16} \}$ ve

$\hat{Y} = \{ N_{02}, N_{03}, N_{04}, N_{05}, N_{14}, N_{17}, N_{21}, N_{22}, N_{23}, N_{24}, N_{25}, N_{26}, N_{27}, N_{28}, N_{29}, N_{30}, N_{31}, N_{32}, N_{33}, N_{34}, N_J, N_K, N_L, N_M, N_N, N_O, N_P \}$

$\{N_{16}\}$ $\hat{Y}$ kümesinden ayrılmıştır. Y ye bağlantılı ve ağaç dışındaki arkların en küçüğü $A_{16, 21}$ (165 m ile) ağaca dahil olur. Yeni durumda,

24. $Y = \{ N_{01}, N_{12}, N_{11}, N_G, N_H, N_{13}, N_{19}, N_{20}, N_I, N_{18}, N_E, N_{10}, N_{09}, N_{08}, N_D, N_{07}, N_C, N_F, N_{06}, N_{15}, N_B, N_A, N_{16}, N_{21} \}$ ve

$\hat{Y} = \{ N_{02}, N_{03}, N_{04}, N_{05}, N_{14}, N_{17}, N_{22}, N_{23}, N_{24}, N_{25}, N_{26}, N_{27}, N_{28}, N_{29}, N_{30}, N_{31}, N_{32}, N_{33}, N_{34}, N_J, N_K, N_L, N_M, N_N, N_O, N_P \}$

$\{N_{21}\}$ $\hat{Y}$ kümesinden ayrılmıştır. Y ye bağlantılı ve ağaç dışındaki arkların en küçüğü $A_{21, 22}$ (45 m ile) ağaca dahil olur. Yeni durumda,

25. $Y = \{ N_{01}, N_{12}, N_{11}, N_G, N_H, N_{13}, N_{19}, N_{20}, N_I, N_{18}, N_E, N_{10}, N_{09}, N_{08}, N_D, N_{07}, N_C, N_F, N_{06}, N_{15}, N_B, N_A, N_{16}, N_{21}, N_{22} \}$ ve

$\hat{Y} = \{ N_{02}, N_{03}, N_{04}, N_{05}, N_{14}, N_{17}, N_{23}, N_{24}, N_{25}, N_{26}, N_{27}, N_{28}, N_{29}, N_{30}, N_{31}, N_{32}, N_{33}, N_{34}, N_J, N_K, N_L, N_M, N_N, N_O, N_P \}$

$\{N_{22}\}$ $\hat{Y}$ kümesinden ayrılmıştır. Y ye bağlantılı ve ağaç dışındaki arkların en küçüğü $A_{22, 23}$ (40 m ile) ağaca dahil olur. Yeni durumda,

26. $Y = \{ N_{01}, N_{12}, N_{11}, N_G, N_H, N_{13}, N_{19}, N_{20}, N_I, N_{18}, N_E, N_{10}, N_{09}, N_{08}, N_D, N_{07}, N_C, N_F, N_{06}, N_{15}, N_B, N_A, N_{16}, N_{21}, N_{22}, N_{23} \}$ ve

$\hat{Y} = \{ N_{02}, N_{03}, N_{04}, N_{05}, N_{14}, N_{17}, N_{24}, N_{25}, N_{26}, N_{27}, N_{28}, N_{29}, N_{30}, N_{31}, N_{32}, N_{33}, N_{34}, N_J, N_K, N_L, N_M, N_N, N_O, N_P \}$

$\{N_{23}\}$ $\hat{Y}$ kümesinden ayrılmıştır. Y ye bağlantılı ve ağaç dışındaki arkların en küçüğü $A_{21,J}$

(75 m ile) ağaca dahil olur. $A_{21,J}$ arkı tek yönlü olmakla birlikte müşteriye giden son ve mecburi hat olması nedeni ile her olasılıkta değerlendirilme durumunda olduğu için dahil edilmiştir. Yeni durumda,

27. $Y = \{ N_{01}, N_{12}, N_{11}, N_G, N_H, N_{13}, N_{19}, N_{20}, N_I, N_{18}, N_E, N_{10}, N_{09}, N_{08}, N_D, N_{07}, N_C, N_F, N_{06}, N_{15}, N_B, N_A, N_{16}, N_{21}, N_{22}, N_{23}, N_J \}$ ve

$\hat{Y} = \{ N_{02}, N_{03}, N_{04}, N_{05}, N_{14}, N_{17}, N_{24}, N_{25}, N_{26}, N_{27}, N_{28}, N_{29}, N_{30}, N_{31}, N_{32}, N_{33}, N_{34}, N_K, N_L, N_M, N_N, N_O, N_P \}$

$\{N_J\}$ $\hat{Y}$ kümesinden ayrılmıştır. Y ye bağlantılı ve ağaç dışındaki arkların en küçüğü $A_{22,K}$

(90 m ile) ağaca dahil olur. $A_{22,K}$ arkı da, tek yönlü olmakla birlikte müşteriye giden son mecburi hat olması nedeni ve her olasılıkta değerlendirilme durumunda olduğu için dahil edilmiştir. Yeni durumda,

28. $Y = \{ N_{01}, N_{12}, N_{11}, N_G, N_H, N_{13}, N_{19}, N_{20}, N_I, N_{18}, N_E, N_{10}, N_{09}, N_{08}, N_D, N_{07}, N_C, N_F, N_{06}, N_{15}, N_B, N_A, N_{16}, N_{21}, N_{22}, N_{23}, N_J, N_K \}$ ve

$\hat{Y} = \{ N_{02}, N_{03}, N_{04}, N_{05}, N_{14}, N_{17}, N_{24}, N_{25}, N_{26}, N_{27}, N_{28}, N_{29}, N_{30}, N_{31}, N_{32}, N_{33}, N_{34}, N_L, N_M, N_N, N_O, N_P \}$

$\{N_K\}$ $\hat{Y}$ kümesinden ayrılmıştır. Y ye bağlantılı ve ağaç dışındaki arkların en küçüğü $A_{23,L}$

(105 m ile) ağaca dahil olur. $A_{23,L}$ arkı da aynı biçimde tek yönlü olmakla birlikte müşteriye giden son mecburi hat olması nedeni ve her olasılıkta değerlendirilme durumunda olduğu için dahil edilmiştir. Yeni durumda,

29. $Y = \{ N_{01}, N_{12}, N_{11}, N_G, N_H, N_{13}, N_{19}, N_{20}, N_I, N_{18}, N_E, N_{10}, N_{09}, N_{08}, N_D, N_{07}, N_C, N_F, N_{06}, N_{15}, N_B, N_A, N_{16}, N_{21}, N_{22}, N_{23}, N_J, N_K, N_L \}$ ve

$\hat{Y} = \{ N_{02}, N_{03}, N_{04}, N_{05}, N_{14}, N_{17}, N_{24}, N_{25}, N_{26}, N_{27}, N_{28}, N_{29}, N_{30}, N_{31}, N_{32}, N_{33}, N_{34}, N_M, N_N, N_O, N_P \}$

$\{N_L\}$ $\hat{Y}$ kümesinden ayrılmıştır. Y ye bağlantılı ve ağaç dışındaki arkların en küçüğü $A_{23,32}$

(294 m ile) ağaca dahil olur. Yeni durumda,

30. $Y = \{ N_{01}, N_{12}, N_{11}, N_G, N_H, N_{13}, N_{19}, N_{20}, N_I, N_{18}, N_E, N_{10}, N_{09}, N_{08}, N_D, N_{07}, N_C, N_F, N_{06}, N_{15}, N_B, N_A, N_{16}, N_{21}, N_{22}, N_{23}, N_J, N_K, N_L, N_{32} \}$ ve

$\hat{Y} = \{ N_{02}, N_{03}, N_{04}, N_{05}, N_{14}, N_{17}, N_{24}, N_{25}, N_{26}, N_{27}, N_{28}, N_{29}, N_{30}, N_{31}, N_{33}, N_{34}, N_M, N_N, N_O, N_P \}$

$\{N_{32}\}$ $\hat{Y}$ kümesinden ayrılmıştır. Y ye bağlantılı ve ağaç dışındaki arkların en küçüğü $A_{32, M}$

(60 m ile) ağaca dahil olur. Yeni durumda,

31. $Y = \{ N_{01}, N_{12}, N_{11}, N_G, N_H, N_{13}, N_{19}, N_{20}, N_I, N_{18}, N_E, N_{10}, N_{09}, N_{08}, N_D, N_{07}, N_C, N_F, N_{06}, N_{15}, N_B, N_A, N_{16}, N_{21}, N_{22}, N_{23}, N_J, N_K, N_L, N_{32}, N_M \}$ ve

$\hat{Y} = \{ N_{02}, N_{03}, N_{04}, N_{05}, N_{14}, N_{17}, N_{24}, N_{25}, N_{26}, N_{27}, N_{28}, N_{29}, N_{30}, N_{31}, N_{33}, N_{34}, N_N, N_O, N_P \}$

$\{N_M\}$ $\hat{Y}$ kümesinden ayrılmıştır. Y ye bağlantılı ve ağaç dışındaki arkların en küçüğü $A_{32, 31}$

(109 m ile) ağaca dahil olur. Yeni durumda,

32. $Y = \{ N_{01}, N_{12}, N_{11}, N_G, N_H, N_{13}, N_{19}, N_{20}, N_I, N_{18}, N_E, N_{10}, N_{09}, N_{08}, N_D, N_{07}, N_C, N_F, N_{06}, N_{15}, N_B, N_A, N_{16}, N_{21}, N_{22}, N_{23}, N_J, N_K, N_L, N_{32}, N_M, N_{31} \}$ ve

$\hat{Y} = \{ N_{02}, N_{03}, N_{04}, N_{05}, N_{14}, N_{17}, N_{24}, N_{25}, N_{26}, N_{27}, N_{28}, N_{29}, N_{30}, N_{33}, N_{34}, N_N, N_O, N_P \}$

$\{N_{31}\}$ $\hat{Y}$ kümesinden ayrılmıştır. Y ye bağlantılı ve ağaç dışındaki arkların en küçüğü $A_{31, 30}$

(236 m ile) ağaca dahil olur. Yeni durumda,

33. $Y = \{ N_{01}, N_{12}, N_{11}, N_G, N_H, N_{13}, N_{19}, N_{20}, N_I, N_{18}, N_E, N_{10}, N_{09}, N_{08}, N_D, N_{07}, N_C, N_F, N_{06}, N_{15}, N_B, N_A, N_{16}, N_{21}, N_{22}, N_{23}, N_J, N_K, N_L, N_{32}, N_M, N_{31}, N_{30} \}$ ve

$\hat{Y} = \{ N_{02}, N_{03}, N_{04}, N_{05}, N_{14}, N_{17}, N_{24}, N_{25}, N_{26}, N_{27}, N_{28}, N_{29}, N_{33}, N_{34}, N_N, N_O, N_P \}$

$\{N_{30}\}$ $\hat{Y}$ kümesinden ayrılmıştır. Y ye bağlantılı ve ağaç dışındaki arkların en küçüğü $A_{30, 29}$

(110 m ile) ağaca dahil olur. Yeni durumda,

34. $Y = \{ N_{01}, N_{12}, N_{11}, N_G, N_H, N_{13}, N_{19}, N_{20}, N_I, N_{18}, N_E, N_{10}, N_{09}, N_{08}, N_D, N_{07}, N_C, N_F, N_{06}, N_{15}, N_B, N_A, N_{16}, N_{21}, N_{22}, N_{23}, N_J, N_K, N_L, N_{32}, N_M, N_{31}, N_{30}, N_{29} \}$ ve

$\hat{Y} = \{ N_{02}, N_{03}, N_{04}, N_{05}, N_{14}, N_{17}, N_{24}, N_{25}, N_{26}, N_{27}, N_{28}, N_{33}, N_{34}, N_N, N_O, N_P \}$

$\{N_{29}\}$ $\hat{Y}$ kümesinden ayrılmıştır. Y ye bağlantılı ve ağaç dışındaki arkların en küçüğü $A_{29, N}$

(30 m ile) ağaca dahil olur. Yeni durumda,

35. $Y = \{ N_{01}, N_{12}, N_{11}, N_G, N_H, N_{13}, N_{19}, N_{20}, N_I, N_{18}, N_E, N_{10}, N_{09}, N_{08}, N_D, N_{07}, N_C, N_F, N_{06}, N_{15}, N_B, N_A, N_{16}, N_{21}, N_{22}, N_{23}, N_J, N_K, N_L, N_{32}, N_M, N_{31}, N_{30}, N_{29}, N_N \}$ ve

$$\hat{Y} = \{ N_{02}, N_{03}, N_{04}, N_{05}, N_{14}, N_{17}, N_{24}, N_{25}, N_{26}, N_{27}, N_{28}, N_{33}, N_{34}, N_O, N_P \}$$

$\{N_N\}$ $\hat{Y}$ kümesinden ayrılmıştır. Y ye bağlantılı ve ağaç dışındaki arkların en küçüğü $A_{31,33}$

(304 m ile) ağaca dahil olur. Yeni durumda,

$$36. Y = \{ N_{01}, N_{12}, N_{11}, N_G, N_H, N_{13}, N_{19}, N_{20}, N_I, N_{18}, N_E, N_{10}, N_{09}, N_{08}, N_D, N_{07}, N_C, N_F, N_{06}, N_{15}, N_B, N_A, N_{16}, N_{21}, N_{22}, N_{23}, N_J, N_K, N_L, N_{32}, N_M, N_{31}, N_{30}, N_{29}, N_N, N_{33} \} \text{ ve}$$

$$\hat{Y} = \{ N_{02}, N_{03}, N_{04}, N_{05}, N_{14}, N_{17}, N_{24}, N_{25}, N_{26}, N_{27}, N_{28}, N_{34}, N_O, N_P \}$$

$\{N_{33}\}$ $\hat{Y}$ kümesinden ayrılmıştır. Y ye bağlantılı ve ağaç dışındaki arkların en küçüğü $A_{33,P}$

(48 m ile) ağaca dahil olur. Yeni durumda,

$$37. Y = \{ N_{01}, N_{12}, N_{11}, N_G, N_H, N_{13}, N_{19}, N_{20}, N_I, N_{18}, N_E, N_{10}, N_{09}, N_{08}, N_D, N_{07}, N_C, N_F, N_{06}, N_{15}, N_B, N_A, N_{16}, N_{21}, N_{22}, N_{23}, N_J, N_K, N_L, N_{32}, N_M, N_{31}, N_{30}, N_{29}, N_N, N_{33}, N_P \} \text{ ve}$$

$$\hat{Y} = \{ N_{02}, N_{03}, N_{04}, N_{05}, N_{14}, N_{17}, N_{24}, N_{25}, N_{26}, N_{27}, N_{28}, N_{34}, N_O \}$$

$\{N_P\}$ $\hat{Y}$ kümesinden ayrılmıştır. N_P Müşteridir. Y ye bağlantılı ve ağaç dışındaki arkların en küçüğü ve sonuncusu $A_{33,O}$ (58 m ile) ağaca dahil olur. Yeni durumda,

$$38. Y = \{ N_{01}, N_{12}, N_{11}, N_G, N_H, N_{13}, N_{19}, N_{20}, N_I, N_{18}, N_E, N_{10}, N_{09}, N_{08}, N_D, N_{07}, N_C, N_F, N_{06}, N_{15}, N_B, N_A, N_{16}, N_{21}, N_{22}, N_{23}, N_J, N_K, N_L, N_{32}, N_M, N_{31}, N_{30}, N_{29}, N_N, N_{33}, N_P, N_O \} \text{ ve}$$

$$\hat{Y} = \{ N_{02}, N_{03}, N_{04}, N_{05}, N_{14}, N_{17}, N_{24}, N_{25}, N_{26}, N_{27}, N_{28}, N_{34} \}$$

Artık müşteri olan $\{N_0\}$ 'ın $\hat{Y}$ kümesinden ayrılması ile

$\hat{Y} \not\subset \{A, B, C, D, E, F, G, H, I, J, K, L, M, N, O, P\} \Rightarrow \hat{Y} = \emptyset$ şartı sağlanmıştır. Yani henüz ağaca dahil olmayan $\hat{Y}$ kümesinde mevcut kuyular olsa dahi, gerçek tüketimleri ile müşteri sağlayan kuyuların artık $\hat{Y}$ kümesinde olmaması ile $\hat{Y} = \emptyset$ şartı gerçekleşmiş olur ve algoritma son bulmuş olur.

Network'ün noktaları belirlenen arklarla bağlandığında minimal yayılım yapan elde edilmiş olur.

Bu durumda minimal yayılım gösteren ağaç kümesi 38. Adımda bulunan aşağıdaki,

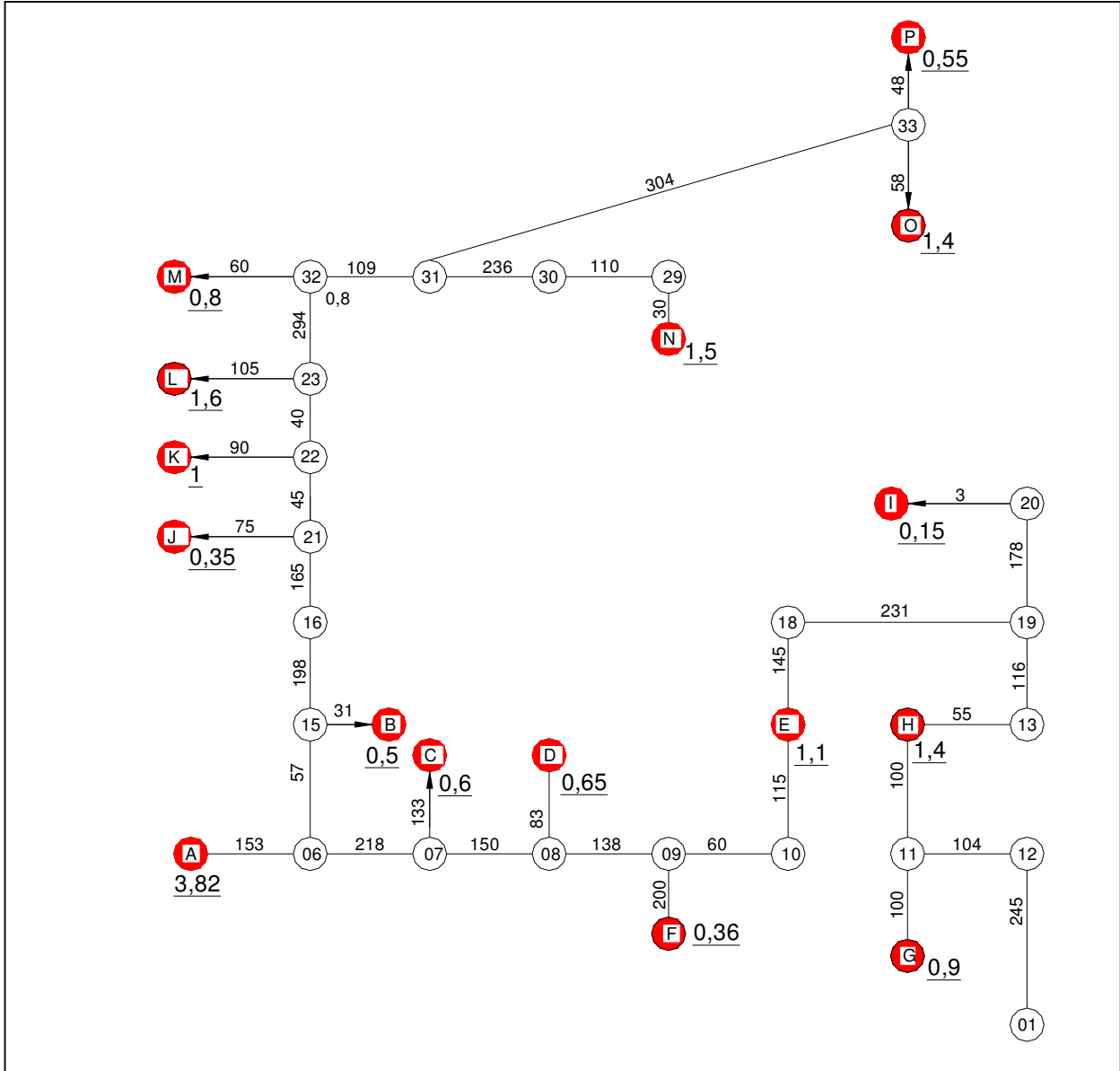
$$Y = \{ N_{01}, N_{12}, N_{11}, N_G, N_H, N_{13}, N_{19}, N_{20}, N_I, N_{18}, N_E, N_{10}, N_{09}, N_{08}, N_D, N_{07}, N_C, N_F, N_{06}, N_{15}, N_B, N_A, N_{16}, N_{21}, N_{22}, N_{23}, N_J, N_K, N_L, N_{32}, N_M, N_{31}, N_{30}, N_{29}, N_N, N_{33}, N_P, N_O \}$$

Küme olmakla birlikte şartımız olan, “müşteri (tüketimi yapan kuyular) noktalarını bağlayan

arklarla yapılan minimum ağaç” için ilk seçim ve başlangıç noktamız olan N_{01} ve N_{12} noktalarının müşteriler için oluşturulan ağacın dışında kaldığı görülmektedir. $A_{01,12}$ (245 m) ve $A_{12,11}$ (104 m) arklarının birleşmesi ile olan yol, bu ağaçtan çıkarılabilir.

Dikkat edilirse, herhangi bir kaynak noktasının bu iki kaynak noktasında atanmaması durumunda, her ikisinin de tüketim miktarları sıfır (0) olacak ve tüketime dahil edilmeyeceklerdir. Kaynak noktalarının bu iki noktadan birisine atanması durumunda da Tüketim yükünün artmasına neden olacaklardır. Bu açıklamalara rağmen, sonucu da görmek amacıyla toplam $(245+104)= 349$ m uzunluğunda olan bu hat çıkarılmayacak, algoritma sonucu çıkan ve minimal yayılım gösteren ağaçtaki varlığı, çözüm sonuna dek devam edecektir.

Şekil6.10 daki, bu, minimal yayılım gösteren ve müşterilere ulaşabilmek için arklarının minimum toplamı 4.551 m olan yeni ağacımız görülmektedir. (Tüketim miktarları “0” olan arkların toplam mesafesi olan, 349 m’nin düşmesi durumunda ise bu mesafe toplam 4.202 m olacaktır.)



Şekil 5.11 Minimum yayılmış ağaç (Toplam $L_p=4.333$ m, $Q=16.68$ t/h)

$Y=\{ N_{01}, N_{12}, N_{11}, N_G, N_H, N_{13}, N_{19}, N_{20}, N_I, N_{18}, N_E, N_{10}, N_{09}, N_{08}, N_D, N_{07}, N_C, N_F, N_{06}, N_{15}, N_B, N_A, N_{16}, N_{21}, N_{22}, N_{23}, N_J, N_K, N_L, N_{32}, N_M, N_{31}, N_{30}, N_{29}, N_N, N_{33}, N_P, N_O \}$

ve $\hat{Y} = \emptyset$

Minimum yayılım elde edilmiş olmakla birlikte henüz kaynak noktası (santral) konumlandırılmamıştır.

Buraya kadar, OSB dahilinde bulunan ve kapasiteleri belirli olan mevcut müşterilere yapılabilecek olan minimum uzunluktaki güzergah yerleşimi tespit etmiş olmakla birlikte kaynak noktasının (santralin) konumu, belirlenmemiştir. Bu durum zaten, minimal yayılma algoritmasının bir sonucu olmamakla birlikte sonucu bulmakta 1. aşamayı teşkil etmektedir.

Network' den oluşturduğumuz ağdaki dağıtım hattı boyunca oluşacak hat kapasiteleri, kaynağın bulunduğu her bir olası noktaya göre değişkenlik arz edecektir. Müşteriler ile santralin rölatif konumu dolayısıyla müşterilerin belirli tüketim kapasitelerinin toplamı, dağıtım güzergahı boyunca olan taşınacak kapasiteleri belirleyecektir. Santralin (kaynağın) her bir noktada bulunma olasılığı, her alternatifin birbirleri arasında tüketim kapasiteleri farklılığı oluşturacaktır. Bu durumda (5.12), (5.34) ve (5.35) den hatırlayacağımız üzere buhar taşıyan hat çapında değişkenlikler oluşacak bu da doğrudan yatırım maliyetini etkileyecektir.

$$D_o = f(Q, L_p) \text{ (mm)} \quad (5.12)$$

$$Q_{i,j}=c \Rightarrow \min D_{o,i,j}=f(Q, \min_{i,j}, L_p) \quad (5.34)$$

$$L_{p,i,j}=c \Rightarrow \min D_{o,i,j}=f(\min Q_{i,j}, L_p) \quad (5.35)$$

idi.

Yukarıda bahsedilen durumda, belirli bir tüketim güzergahı boyunca, farklı noktalarda bulunan kaynak noktasının tüketim veya debi potansiyel farklılıkları oluşturduğu anlaşılmaktadır.

Böylece, ikinci bir çözüm aşaması ile santral yerinin (kaynağın) en optimum konumda olması için gerekli algoritmalar uygulanacaktır.

Minimum Potansiyel Farkına Göre Belirleme

Bu algoritmaya göre çözüm için kaynak noktasının, güzergah içinde olası tüm noktalarda bulunmasına göre doğabilecek potansiyel farklarının minimize edilmesinden yararlanılacaktır. Burada, potansiyel farkları, olası alternatifler durumunda, tüketim miktarları arasındaki farklılıklar olarak ele alınacaktır.

Şekil 5.11 da verilen ağda, kaynak yerinin olası konumuna göre güzergah boyunca yapacağı debi miktarlarının durumu yeni bir network oluşturmaktadır. Bu network'ü gösteren şekil aşağıdadır.

X=kaynak noktası (Santral) olmak üzere, her bir kuyu yakınında olması ve bu kuyu noktası üzerinden dağıtım yapması muhtemel görülmüştür. Yalnızca burada kaynağın yerleşimindeki kısıt, kaynağın J, K, L kuyu noktaları üzerinden dağıtım yapamamasıdır. Kaynağın her bir kuyuya ulaşımını, şekil üzerinde tek noktadan göstermek zor ve karışık olacağı için, üç adet kaynak noktası (X) ayrı olarak gösterilmiştir. Her bir (X) kaynak noktası tek bir kaynak noktası anlamındadır. Kaynak noktası ile kuyular arasındaki ark, alternatif olması ve kaynaktan kuyulara akışı temsil etmesi amacıyla kesikli çizgi olarak gösterilmiştir. Kaynak noktasından kuyulara akış tek yönlüdür. Kaynak (Santral) kapasitesi, gerçekte 30t/h olmakla

birlikte burada müşteri kapasitelerinin toplamı olarak verilmiştir.

$Q(X) = 16.68$ t/h Kuyu (müşteri) tüketimleri toplamı

$A_{X,KUYU} = 100$ m [Kaynak (Santral) olası konumu ile her bir kuyu (müşteri) veya ana dağıtım hattı ilk noktası arası mesafe istatistiksel olarak yapılan gözlemlere göre sabit kabul edildi. Şekil 5.12]

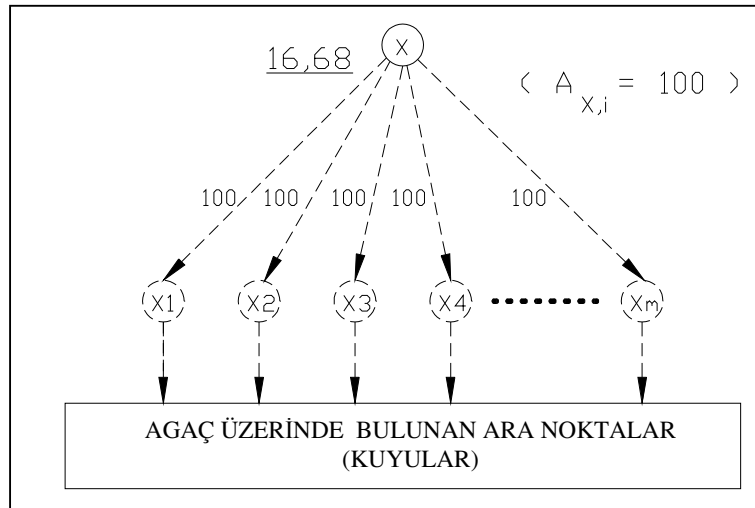
Kısıtlar;

$$\forall \{N_X, N_{i,j}\} = A_{X,ij} = 100 \text{ m}$$

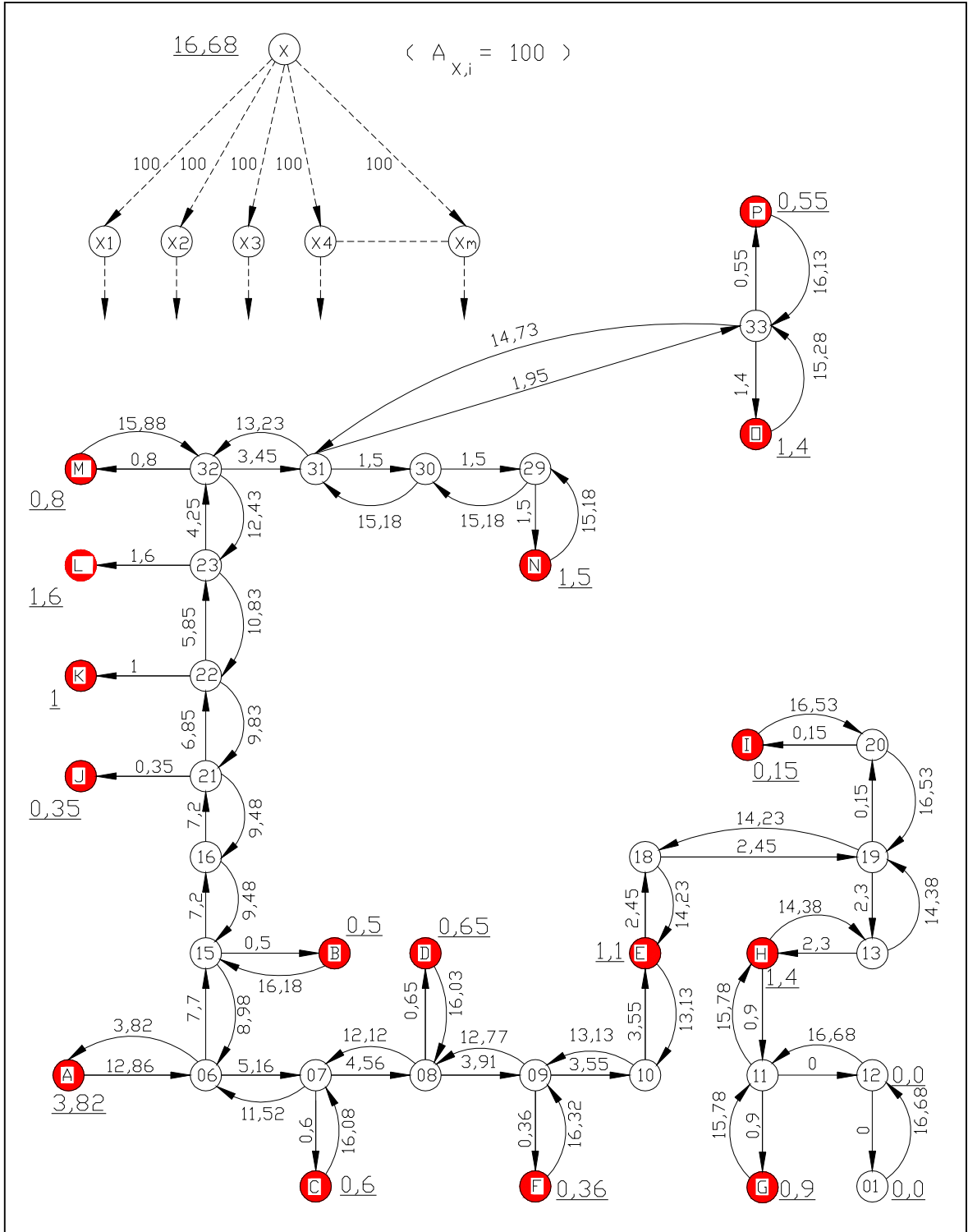
$$\left. \begin{array}{l} \{N_X, N_J\}, A_{X,J} \\ \{N_X, N_K\}, A_{X,K} \\ \{N_X, N_L\}, A_{X,L} \end{array} \right\} = \emptyset \text{ olmaktadır. (Coğrafi yerleşim ve müşteri şartlarından dolayı.)}$$

Şekil 5.12 de X kaynak noktasının, yukarıda belirtilen kısıtları ve şartı sağlamak üzere her bir kuyu noktasından mevcut ağaca bağlanması durumunda, ağaç (boru hattı güzergahı) boyunca gerçekleşebilecek olası hat kapasitelerinin genel yapısı gösterilmektedir.

Şekil 5.13 de ise X kaynak noktasının, yukarıda belirtilen kısıtları ve şartı sağlamak üzere mevcut ağaç üzerinde her bir kuyu noktasına bağlanması durumunda arklarda olabilecek olası kapasite durumları ve yönleri görülmektedir.



Şekil 5.13 Kaynak Noktasının (Santral), bulunan ağaca olası birleşme noktaları



Şekil 5.14 Kaynak noktasının (Santral), her bir kuyu noktasına bağlanması durumunda, hat boyunca olası kapasite durumları ve yönleri.

Minimal yayılma algoritması ile oluşturulmuş olan ağaç, başlangıç ağacımız olduğu gibi olası ağaçlar arasında en kısa ağacı da oluşturduğu için, minimum potansiyel farkı (Bölüm 4.10) ile bu ağaç içinde kaynak noktasının belirlenmesi ile hatlarda olası en küçük kapasiteleri ve bundan dolayı gerekli olan minimum kesit ve maliyet arz eden boru çapını belirleyeceğiz. Burada olası arkların devreye girmesi ile yeni bir network oluşmuş ve buradaki amacımız bu network'deki minimum kapasite farklarını oluşturacak ağacı bulmamızdır.

Hatların kapasiteleri ve aralarındaki fark potansiyel farklarını oluşturmaktadır.

Bu yeni network içindeki;

$N_{01}, N_{12}, N_{11}, N_G, N_H, N_{13}, N_{19}, N_{20}, N_I, N_{18}, N_E, N_{10}, N_{09}, N_{08}, N_D, N_{07}, N_C, N_F, N_{06}, N_{15}, N_B, N_A, N_{16}, N_{21}, N_{22}, N_{23}, N_J, N_K, N_L, N_{32}, N_M, N_{31}, N_{30}, N_{29}, N_N, N_{33}, N_P, N_O$

noktaları ve

$A_{A,06}, A_{06,A}, A_{06,15}, A_{06,15}, A_{06,07}, A_{07,06}, A_{07,C}, A_{C,07}, A_{07,08}, A_{08,07}, A_{08,D}, A_{D,08}, A_{08,09}, A_{09,08}, A_{09,F}, A_{F,09}, A_{09,10}, A_{10,09}, A_{10,E}, A_{E,10}, A_{E,18}, A_{18,E}, A_{18,19}, A_{19,18}, A_{19,20}, A_{20,19}, A_{20,I}, A_{I,20}, A_{19,13}, A_{13,19}, A_{13,H}, A_{H,13}, A_{H,11}, A_{11,H}, A_{11,G}, A_{G,11}, A_{11,12}, A_{12,11}, A_{12,01}, A_{01,12}, A_{15,B}, A_{B,15}, A_{15,16}, A_{16,15}, A_{16,21}, A_{21,16}, A_{21,J}, A_{A21,22}, A_{22,21}, A_{22,K}, A_{22,23}, A_{23,22}, A_{23,L}, A_{23,32}, A_{32,23}, A_{32,M}, A_{M,32}, A_{32,31}, A_{31,32}, A_{31,30}, A_{30,31}, A_{30,29}, A_{29,30}, A_{29,N}, A_{N,29}, A_{31,33}, A_{33,31}, A_{33,O}, A_{O,33}, A_{33,P}, A_{P,33}$

Arklarından oluşan noktaları göz önüne alalım. Arklardaki potansiyel farkları için kısıtlar;

$$3,82 \leq f_A - f_{06} \leq 12,86 \quad , \quad 5,16 \leq f_{06} - f_{07} \leq 11,52 \quad , \quad 0,6 \leq f_{07} - f_C \leq 16,08 \quad ,$$

$$4,56 \leq f_{07} - f_{08} \leq 12,12 \quad , \quad 0,65 \leq f_{08} - f_D \leq 16,03 \quad , \quad 3,91 \leq f_{08} - f_{09} \leq 12,77 \quad ,$$

$$0,36 \leq f_{09} - f_E \leq 16,32 \quad , \quad 3,55 \leq f_{09} - f_{10} \leq 13,13 \quad , \quad 3,55 \leq f_{10} - f_E \leq 13,13 \quad ,$$

$$2,45 \leq f_E - f_{18} \leq 14,23 \quad , \quad 2,45 \leq f_{18} - f_{19} \leq 14,23 \quad , \quad 0,15 \leq f_{19} - f_{20} \leq 16,53 \quad ,$$

$$0,15 \leq f_{20} - f_I \leq 16,53 \quad , \quad 2,3 \leq f_{19} - f_{13} \leq 14,38 \quad , \quad 2,3 \leq f_{13} - f_H \leq 14,38 \quad ,$$

$$0,9 \leq f_{11} - f_H \leq 15,78 \quad , \quad 0,9 \leq f_{11} - f_G \leq 15,78 \quad , \quad 0 \leq f_{12} - f_{11} \leq 16,68 \quad ,$$

$$0 \leq f_{01} - f_{12} \leq 16,68 \quad , \quad 7,7 \leq f_{15} - f_{06} \leq 8,98 \quad , \quad 0,5 \leq f_B - f_{15} \leq 16,18 \quad ,$$

$$\begin{aligned}
7,2 \leq f_{15}-f_{16} \leq 9,48 & \quad , \quad 7,2 \leq f_{16}-f_{21} \leq 9,48 & \quad , \quad f_{21}-f_J \leq 0,35 & \quad , \\
6,85 \leq f_{21}-f_{22} \leq 9,83 & \quad , \quad 5,85 \leq f_{22}-f_{23} \leq 10,86 & \quad , \quad f_{22}-f_K \leq 1 & \quad , \\
f_{23}-f_L \leq 1,6 & \quad , \quad 4,25 \leq f_{23}-f_{32} \leq 12,43 & \quad , \quad 0,8 \leq f_M-f_{32} \leq 15,88 & \quad , \\
3,45 \leq f_{31}-f_{32} \leq 13,23 & \quad , \quad 1,5 \leq f_{31}-f_{30} \leq 15,18 & \quad , \quad 1,5 \leq f_{30}-f_{29} \leq 15,18 & \quad , \\
1,5 \leq f_N-f_{29} \leq 15,18 & \quad , \quad 1,95 \leq f_{33}-f_{31} \leq 14,73 & \quad , \quad 0,55 \leq f_P-f_{33} \leq 16,13 & \quad , \\
1,4 \leq f_O-f_{33} \leq 15,28 & \quad ,
\end{aligned}$$

olmaktadır ve Şekil 5.14 de buna göre düzenlenmiş olan durum görülmektedir. Network de negatif devre yoktur. Şu halde en az potansiyel farklarını verecek olan yol bulunabilir.

Buna göre kısıtları yeniden düzenleyerek network' de oluşan durumu daha açıkça görebiliriz;

$$\begin{aligned}
f_A-f_{06} \leq 12,86 & \quad , \quad f_{06}-f_A \leq 3,82 & \quad , \quad f_{06}-f_{07} \leq 11,52 & \quad , \quad f_{07}-f_{06} \leq 5,16 & \quad , \\
f_{07}-f_C \leq 0,6 & \quad , \quad f_C-f_{07} \leq 16,68 & \quad , \quad f_{07}-f_{08} \leq 12,12 & \quad , \quad f_{08}-f_{07} \leq 4,56 & \quad , \\
f_{08}-f_D \leq 16,03 & \quad , \quad f_D-f_{08} \leq 0,65 & \quad , \quad f_{08}-f_{09} \leq 12,77 & \quad , \quad f_{09}-f_{08} \leq 3,91 & \quad , \\
f_{09}-f_E \leq 16,32 & \quad , \quad f_E-f_{09} \leq 0,36 & \quad , \quad f_{09}-f_{10} \leq 13,13 & \quad , \quad f_{10}-f_{09} \leq 3,55 & \quad , \\
f_{10}-f_E \leq 13,13 & \quad , \quad f_E-f_{10} \leq 3,55 & \quad , \quad f_E-f_{18} \leq 14,23 & \quad , \quad f_{18}-f_E \leq 2,45 & \quad , \\
f_{18}-f_{19} \leq 14,23 & \quad , \quad f_{19}-f_{18} \leq 2,45 & \quad , \quad f_{19}-f_{20} \leq 16,53 & \quad , \quad f_{20}-f_{19} \leq 0,15 & \quad , \\
f_{20}-f_I \leq 16,53 & \quad , \quad f_I-f_{20} \leq 0,15 & \quad , \quad f_{19}-f_{13} \leq 14,38 & \quad , \quad f_{13}-f_{19} \leq 2,3 & \quad , \\
f_{13}-f_H \leq 14,38 & \quad , \quad f_H-f_{13} \leq 2,3 & \quad , \quad f_{11}-f_H \leq 15,78 & \quad , \quad f_H-f_{11} \leq 0,9 & \quad , \\
f_{11}-f_G \leq 15,78 & \quad , \quad f_G-f_{11} \leq 0,9 & \quad , \quad f_{12}-f_{11} \leq 16,68 & \quad , \quad f_{11}-f_{12} \leq 0 & \quad , \\
f_{01}-f_{12} \leq 16,68 & \quad , \quad f_{12}-f_{01} \leq 0 & \quad , \quad f_{06}-f_{15} \leq 7,7 & \quad , \quad f_{15}-f_{06} \leq 8,98 & \quad , \\
f_B-f_{15} \leq 16,18 & \quad , \quad f_{15}-f_B \leq 0,5 & \quad , \quad f_{15}-f_{16} \leq 9,48 & \quad , \quad f_{16}-f_{15} \leq 7,2 & \quad , \\
f_{16}-f_{21} \leq 9,48 & \quad , \quad f_{21}-f_{16} \leq 7,2 & \quad , \quad f_{21}-f_J \leq 0,35 & \quad , \quad f_{21}-f_{22} \leq 9,83 & \quad , \\
f_{22}-f_{21} \leq 6,85 & \quad , \quad f_{22}-f_{23} \leq 10,86 & \quad , \quad f_{23}-f_{22} \leq 5,85 & \quad , \quad f_{22}-f_K \leq 1 & \quad , \\
f_{23}-f_L \leq 1,6 & \quad , \quad f_{23}-f_{32} \leq 12,43 & \quad , \quad f_{32}-f_{23} \leq 4,25 & \quad , \quad f_{32}-f_M \leq 0,8 & \quad ,
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
f_M-f_{32} &\leq 15,88 \quad , \quad f_{32}-f_{31} \leq 13,23 \quad , \quad f_{31}-f_{32} \leq 3,45 \quad , \quad f_{31}-f_{30} \leq 15,18 \quad , \\
f_{30}-f_{31} &\leq 1,5 \quad , \quad f_{30}-f_{29} \leq 15,18 \quad , \quad f_{29}-f_{30} \leq 1,5 \quad , \quad f_N-f_{29} \leq 15,18 \quad , \\
f_{29}-f_N &\leq 1,5 \quad , \quad f_{33}-f_{31} \leq 14,73 \quad , \quad f_{31}-f_{33} \leq 1,95 \quad , \quad f_{33}-f_P \leq 16,13 \quad , \\
f_P-f_{33} &\leq 16,13 \quad , \quad f_{33}-f_P \leq 0,55 \quad , \quad f_O-f_{33} \leq 15,28 \quad , \quad f_{33}-f_O \leq 1,4 \quad ,
\end{aligned}$$

N_{01} noktasından başlayıp, her seferinde birbirleri arasındaki potansiyel farkları en küçük noktaları,

$f_i-f_j := \min [(f_i-f_j), (f_j-f_i)]$ olacak şekilde bir ağaç oluşturabiliriz.

Bunun için N_{01} den itibaren aşağıdaki şekilde devam edilir;

$$\underline{\min [(f_i-f_j), (f_j-f_i)] = A_{i,j}} \Rightarrow \underline{A_{i,j} \text{ arkı ağaca dahil olur}}$$

$$f_{01}-f_{12} := \min [0 \quad , \quad 16,68] = 0 \quad \Rightarrow \quad A_{12,01} \quad ,$$

$$f_{12}-f_{11} := \min [0 \quad , \quad 16,68] = 0 \quad \Rightarrow \quad A_{11,12} \quad ,$$

$$f_{11}-f_G := \min [0,9 \quad , \quad 15,78] = 0,9 \quad \Rightarrow \quad A_{11,G} \quad ,$$

$$f_{11}-f_H := \min [0,9 \quad , \quad 15,78] = 0,9 \quad \Rightarrow \quad A_{12,01} \quad ,$$

$$f_H-f_{13} := \min [2,3 \quad , \quad 14,23] = 2,3 \quad \Rightarrow \quad A_{13,H} \quad ,$$

$$f_{13}-f_{19} := \min [2,3 \quad , \quad 14,23] = 2,3 \quad \Rightarrow \quad A_{19,13} \quad ,$$

$$f_{19}-f_{20} := \min [0,15 \quad , \quad 16,53] = 0,15 \quad \Rightarrow \quad A_{20,19} \quad ,$$

$$f_{20}-f_I := \min [0,15 \quad , \quad 16,53] = 0,15 \quad \Rightarrow \quad A_{20,I} \quad ,$$

$$f_{19}-f_{18} := \min [2,45 \quad , \quad 14,25] = 2,45 \quad \Rightarrow \quad A_{18,19} \quad ,$$

$$f_{18}-f_E := \min [2,45 \quad , \quad 14,25] = 2,45 \quad \Rightarrow \quad A_{E,18} \quad ,$$

$$f_{10}-f_E := \min [3,55 \quad , \quad 13,13] = 3,55 \quad \Rightarrow \quad A_{10,E} \quad ,$$

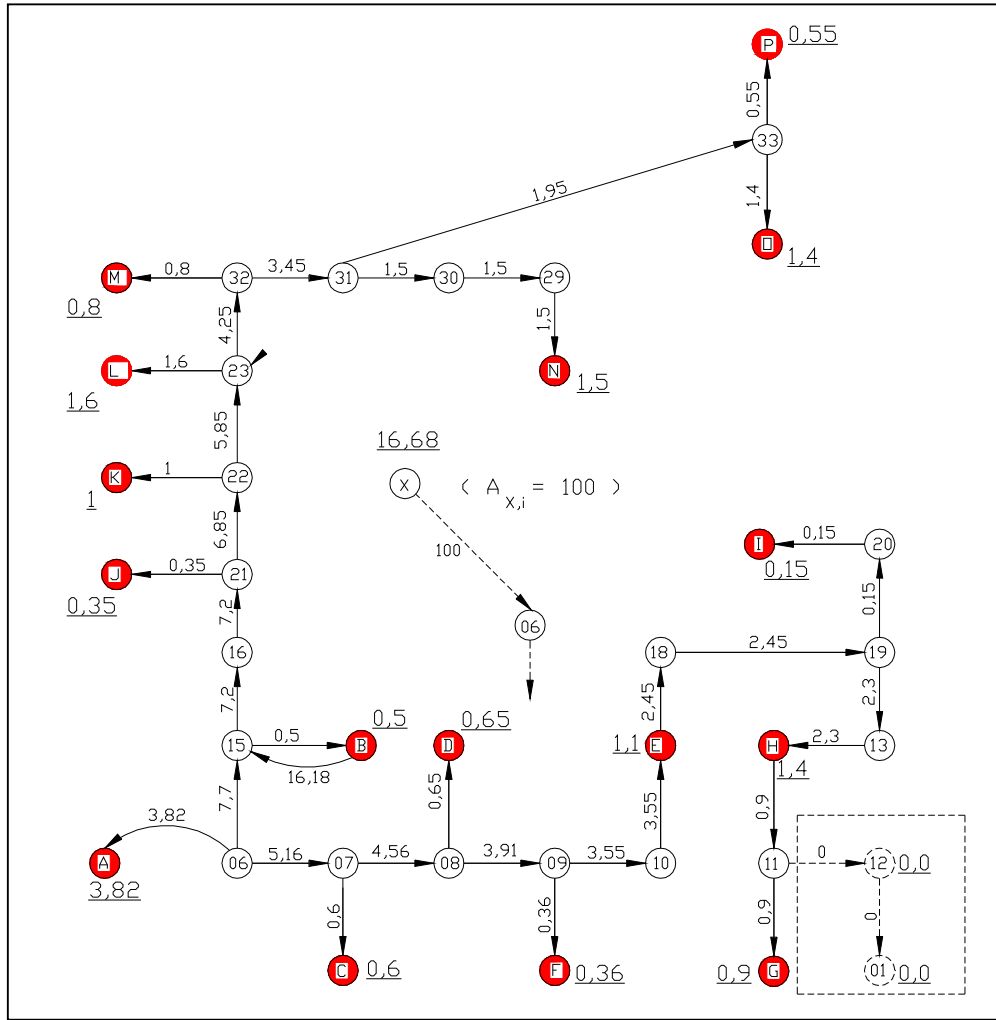
$$f_{10}-f_{09} := \min [3,55 \quad , \quad 13,13] = 3,55 \quad \Rightarrow \quad A_{09,10} \quad ,$$

$$f_{09}-f_F := \min [0,36 \quad , \quad 16,32] = 0,36 \quad \Rightarrow \quad A_{09,F} \quad ,$$

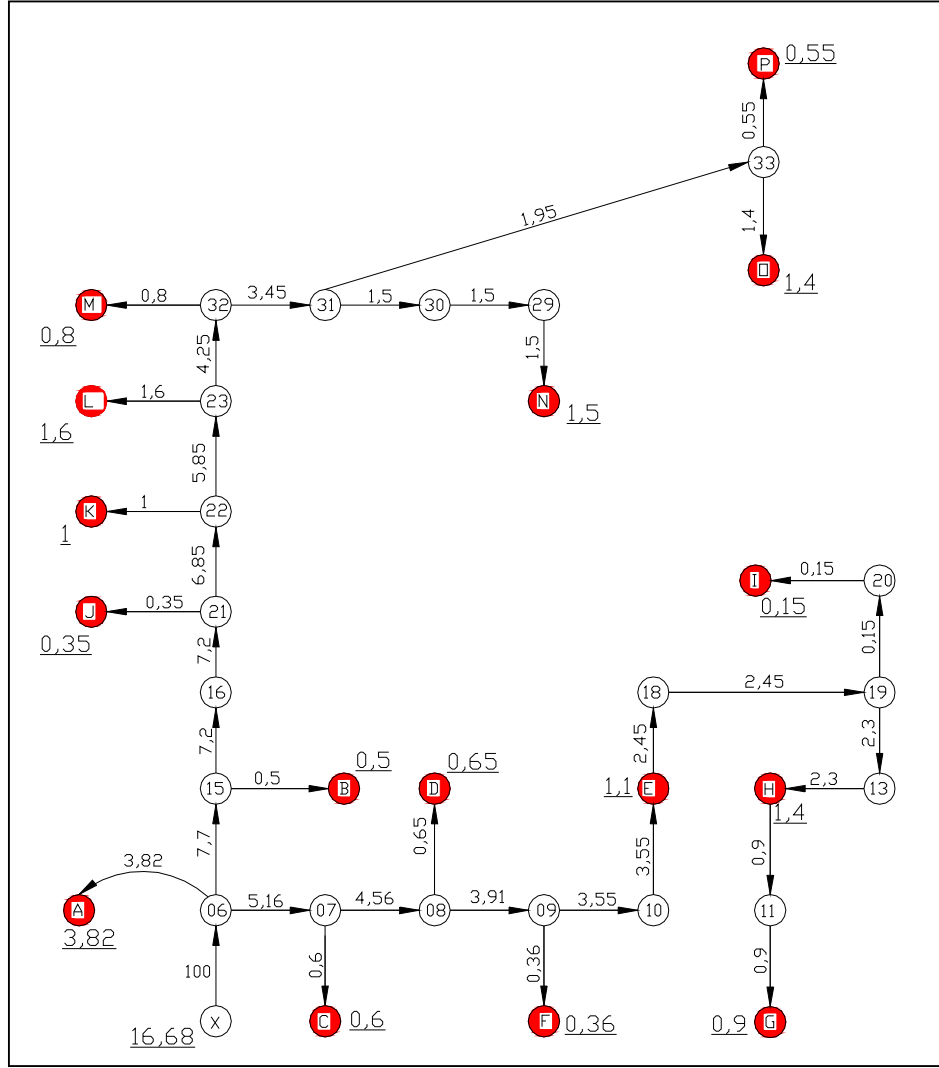
$$f_{09}-f_{08} := \min [0,15 \quad , \quad 16,53] = 0,15 \quad \Rightarrow \quad A_{08,09} \quad ,$$

$$\begin{aligned}
f_{08}-f_E &:=\min [0,65 \quad , \quad 16,03] = 0,65 &\Rightarrow & A_{08,D}, \\
f_{08}-f_{07} &:=\min [4,56 \quad , \quad 12,12] = 0,4,56 &\Rightarrow & A_{07,08}, \\
f_{07}-f_C &:=\min [0,6 \quad , \quad 16,08] = 0,6 &\Rightarrow & A_{07,C}, \\
f_{07}-f_{06} &:=\min [5,16 \quad , \quad 11,52] = 5,16 &\Rightarrow & A_{06,07}, \\
f_{06}-f_A &:=\min [3,82 \quad , \quad 12,86] = 3,82 &\Rightarrow & A_{A,06}, \\
f_{06}-f_{15} &:=\min [7,7 \quad , \quad 8,98] = 7,7 &\Rightarrow & A_{06,15}, \\
f_{15}-f_B &:=\min [0,5 \quad , \quad 16,18] = 0,5 &\Rightarrow & A_{B,15}, \\
f_{15}-f_{16} &:=\min [7,2 \quad , \quad 9,48] = 7,2 &\Rightarrow & A_{15,16}, \\
f_{16}-f_{21} &:=\min [7,2 \quad , \quad 9,48] = 7,2 &\Rightarrow & A_{16,21}, \\
f_{21}-f_J &:=\min [0,35] = 0,35 &\Rightarrow & A_{21,J}, \\
f_{21}-f_{22} &:=\min [6,85 \quad , \quad 9,83] = 6,85 &\Rightarrow & A_{21,22}, \\
f_{22}-f_K &:=\min [1] = 1 &\Rightarrow & A_{22,K}, \\
f_{22}-f_{23} &:=\min [5,85 \quad , \quad 10,83] = 5,85 &\Rightarrow & A_{22,23}, \\
f_{23}-f_L &:=\min [1,6] = 1,6 &\Rightarrow & A_{23,L}, \\
f_{23}-f_{32} &:=\min [4,25 \quad , \quad 12,43] = 4,25 &\Rightarrow & A_{23,32}, \\
f_{32}-f_M &:=\min [0,8 \quad , \quad 15,88] = 0,8 &\Rightarrow & A_{23,M}, \\
f_{32}-f_{31} &:=\min [3,45 \quad , \quad 13,23] = 3,45 &\Rightarrow & A_{32,31}, \\
f_{30}-f_{31} &:=\min [1,5 \quad , \quad 15,18] = 1,5 &\Rightarrow & A_{31,30}, \\
f_{30}-f_{29} &:=\min [1,5 \quad , \quad 15,18] = 1,5 &\Rightarrow & A_{30,29}, \\
f_{29}-f_N &:=\min [1,5 \quad , \quad 15,18] = 1,5 &\Rightarrow & A_{29,N}, \\
f_{31}-f_{33} &:=\min [1,95 \quad , \quad 14,73] = 1,95 &\Rightarrow & A_{31,33}, \\
f_{33}-f_O &:=\min [1,4 \quad , \quad 15,28] = 1,4 &\Rightarrow & A_{33,O}, \\
f_{33}-f_P &:=\min [0,55 \quad , \quad 16,13] = 0,55 &\Rightarrow & A_{33,P},
\end{aligned}$$

olur ve bu noktada algoritma son bulur. Buna göre oluşan sonuç ağaç Şekil 5.15 dir. Burada “0” kapasiteli, N_{12} ve N_{01} noktalarını kapsayan $A_{11,12}$ ve $A_{12,01}$ zinciri kesikli çizgi ile gösterilmiş olup, kesikli çizgi ile kutu içine alınmıştır. Herhangi bir müşteriye ark oluşturmadıkları ve “0” kapasitede oldukları için sonuç ağaca dahil edilmez ve çıkarılırlar. Böylece X kaynak noktasının, bu ağaç üzerinde 06 noktasından itibaren dağıtım yapması veya bu noktaya en yakın konumdan bağlanması sonucunda minimum potansiyel farklarını oluşturarak ağaç üzerinde olası minimum kesitleri veren noktadan bağlanacağını görebiliriz. X noktasının 06 noktasına, her olası ilk bağlanma noktasında olacağı gibi, 100 m uzunluğunda bir ark ile bağlanacağını belirtmiştir. Buna göre sonuç ağacımızı yeniden çizecek olursak en kısa ağaç (güzergah) üzerinde en optimum kaynak noktasını veren (santral) durumu Şekil 5.16 de görebiliriz.



Şekil 5.15 Sonuç ağaç (Minimum potansiyel farklarının olduğu ağaçtır)



Şekil 5.16 Kaynak noktasının, minimum yayılmış ağaçta minimum potansiyel oluşturabilecek noktadan başlayarak dağıtım yapacağı sonuç ağaç. (optimum kaynak noktası yerleşimi)

Sonuç:

Burada minimum yayılan güzergah üzerinde, en az boru kesitini gerektirecek olan, minimum potansiyel farklarının dağıtılabileceği kaynak noktasının tespit edilmesini görmekteyiz. Böylece optimum kaynak noktası yerleşimi sağlanmış olur.

Şimdi bu noktadan başlayan bir kaynak noktası ile, birim maliyet analizlerine göre gerçekleştirilecek maliyeti belirleyelim. Fakat öncelikle bu ağaç üzerindeki boru hat çaplarının tespit edilmesi gerekmektedir.

5.4.3.4 Sonuç ağaç ve yerleşime göre boru hatlarının tespiti.

Kojenerasyon Santrali Buhar Üretim ve müşteri tüketim şartları 5.4.1 de verilmişti. Burada tekrar ederek hatırlayacak olursak:

Kojenerasyon Santrali Buhar Üretim Şartları

Basınç	:	10 barG Doymuş Buhar
Sıcaklık	:	184.1 °C
Ortalama Üretim Miktarı	:	30 t/h

Müşteri Ortalama Tüketim Şartları

Basınç	:	6 barG Doymuş Buhar
Sıcaklık	:	165 °C
Ortalama Üretim Miktarı	:	16,68 t/h

Ağaç boyunca olan arkların mesafelerine ve kapasitelerine ait çizelge aşağıdadır:

Çizelge 5.21 Ark kapasiteleri [mesafe (Lp) ve Debi (Q)]

Ark	Lp (m)	Q (t/h)	Ark	Lp (m)	Q (t/h)
A _{X,06}	100	16,68	A _{06,15}	57	7,7
A _{06,A}	153	3,82	A _{15,B}	31	0,5
A _{06,07}	218	5,16	A _{15,16}	198	7,2
A _{07,C}	133	0,6	A _{16,21}	165	7,2
A _{07,08}	150	4,56	A _{21,J}	75	0,35
A _{08,D}	83	0,65	A _{21,22}	45	6,85
A _{08,09}	138	3,55	A _{22,K}	90	1
A _{09,F}	200	0,36	A _{22,23}	40	5,85
A _{09,10}	60	3,55	A _{23,L}	105	1,6
A _{10,E}	115	3,55	A _{23,32}	294	4,25
A _{E,18}	145	2,45	A _{32,M}	60	0,8
A _{18,19}	231	2,45	A _{32,31}	109	3,45
A _{19,20}	178	0,15	A _{31,30}	236	1,5
A _{20,I}	3	0,15	A _{30,29}	110	1,5
A _{19,13}	116	2,3	A _{29,N}	30	1,5
A _{13,H}	55	2,3	A _{31,33}	304	1,95
A _{H,11}	100	0,9	A _{33,O}	58	1,4
A _{11,G}	100	0,9	A _{33,P}	48	0,55

Müşterilere dağıtımın yapılmış olduğu ağaç (güzergah) üzerinde N₁₀, N₁₃, N₁₈, N₂₀, N₁₆, N₂₀, N₂₉, N₃₀, N₁₁ gibi noktaların kendi hatları boyunca birleşmesiyle oluşan sadeleştirilmiş olan ağaç aşağıdaki şekilde resmedilmiştir. Burada kapasiteler değişmemekte, mesafeler toplanarak birleştirilmektedir Aşağıda birleştirilerek yeniden düzenlenen arkların mesafeleri

görülmektedir:

$$A_{09,E} = A_{09,10} + A_{10,E} = 60 + 115 = 175$$

$$A_{E,19} = A_{E,18} + A_{18,19} = 145 + 231 = 376$$

$$A_{19,I} = A_{19,20} + A_{20,I} = 178 + 3 = 181$$

$$A_{19,H} = A_{19,13} + A_{13,H} = 116 + 55 = 171$$

$$A_{19,I} = A_{19,20} + A_{20,I} = 178 + 3 = 181$$

$$A_{15,21} = A_{15,16} + A_{16,21} = 198 + 165 = 363$$

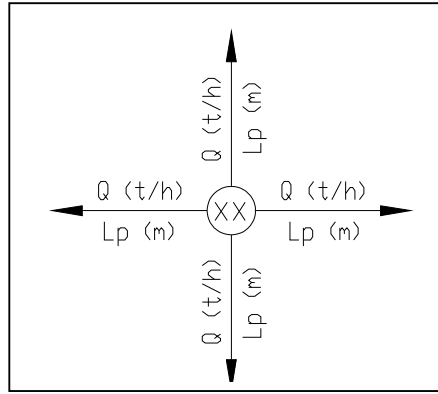
$$A_{31,N} = A_{31,30} + A_{30,29} + A_{29,N} = 236 + 110 + 30 = 376$$

$$A_{H,G} = A_{H,11} + A_{11,G} = 100 + 100 = 200$$

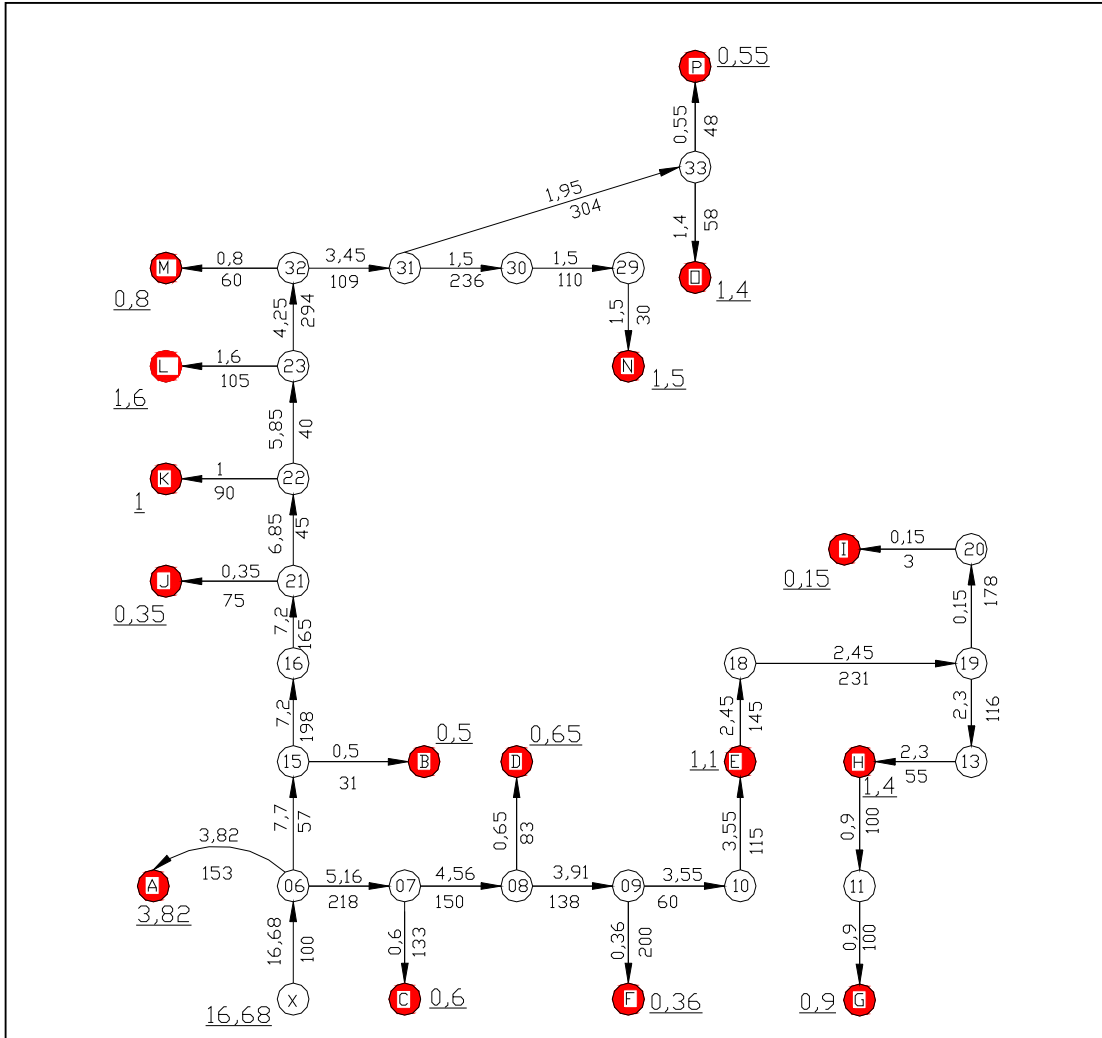
Çizelge 5.22 Sadeleştirilmiş Ark kapasiteleri [mesafe (Lp) ve Debi (Q)]

Ark	Lp (m)	Q (t/h)	Ark	Lp (m)	Q (t/h)
A _{X,06}	100	16,68	A _{15,B}	31	0,5
A _{06,A}	153	3,82	A _{15,21}	363	7,2
A _{06,07}	218	5,16	A _{21,J}	75	0,35
A _{07,C}	133	0,6	A _{21,22}	45	6,85
A _{07,08}	150	4,56	A _{22,K}	90	1
A _{08,D}	83	0,65	A _{22,23}	40	5,85
A _{08,09}	138	3,55	A _{23,L}	105	1,6
A _{09,F}	200	0,36	A _{23,32}	294	4,25
A _{09,E}	175	3,55	A _{32,M}	60	0,8
A _{E,18}	376	2,45	A _{32,31}	109	3,45
A _{19,I}	181	0,15	A _{31,N}	376	1,5
A _{19,H}	171	2,3	A _{31,33}	304	1,95
A _{H,11}	100	0,9	A _{33,O}	58	1,4
A _{11,G}	100	0,9	A _{33,P}	48	0,55
A _{06,15}	57	7,7			

Buna göre Şekil 5.18 de elde edilen dağıtım güzergahı için boru çaplarının hesaplanarak belirlendiği çizelge aşağıdadır. Her bir arkdaki basınç düşümleri maksimum 0,5 bar olacak şekilde yapılmıştır. Şekil 5.16 da , bir noktadan çıkan arktaki kapasite miktarı ve mesafelerin gösterilme biçimi verilmiştir. Buna göre bir arkın üstünde Q(t/h) ile debi ve altında ise Lp(m) ile mesafe bilgisi verilmektedir.



Şekil 5.17 Ark üzerindeki kapasite ve mesafenin gösterilişi



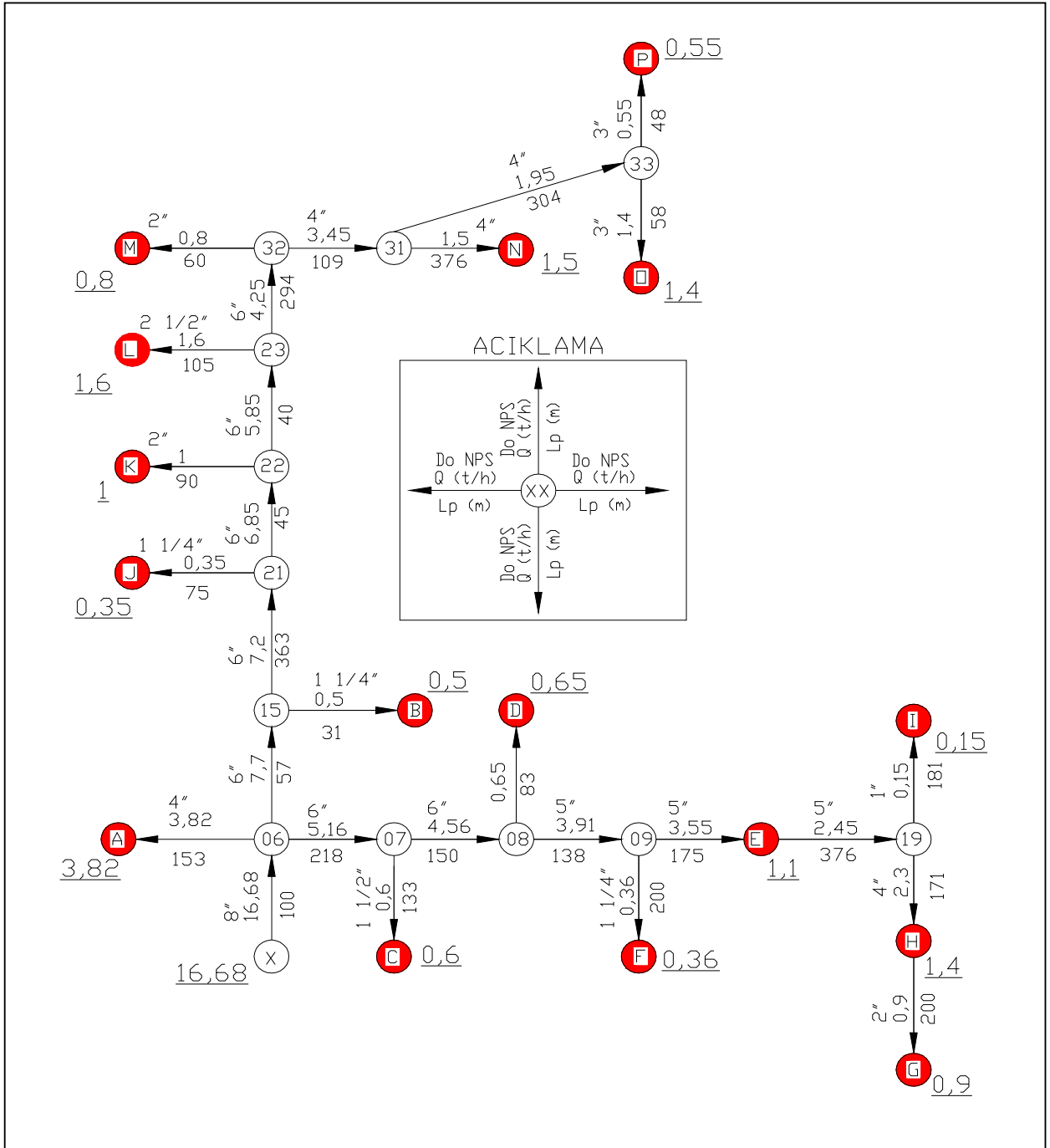
Şekil 5.18 Sonuç ağaçta (Yeni güzergah) Q(t/h) ve Lp(m) gösterilişi.

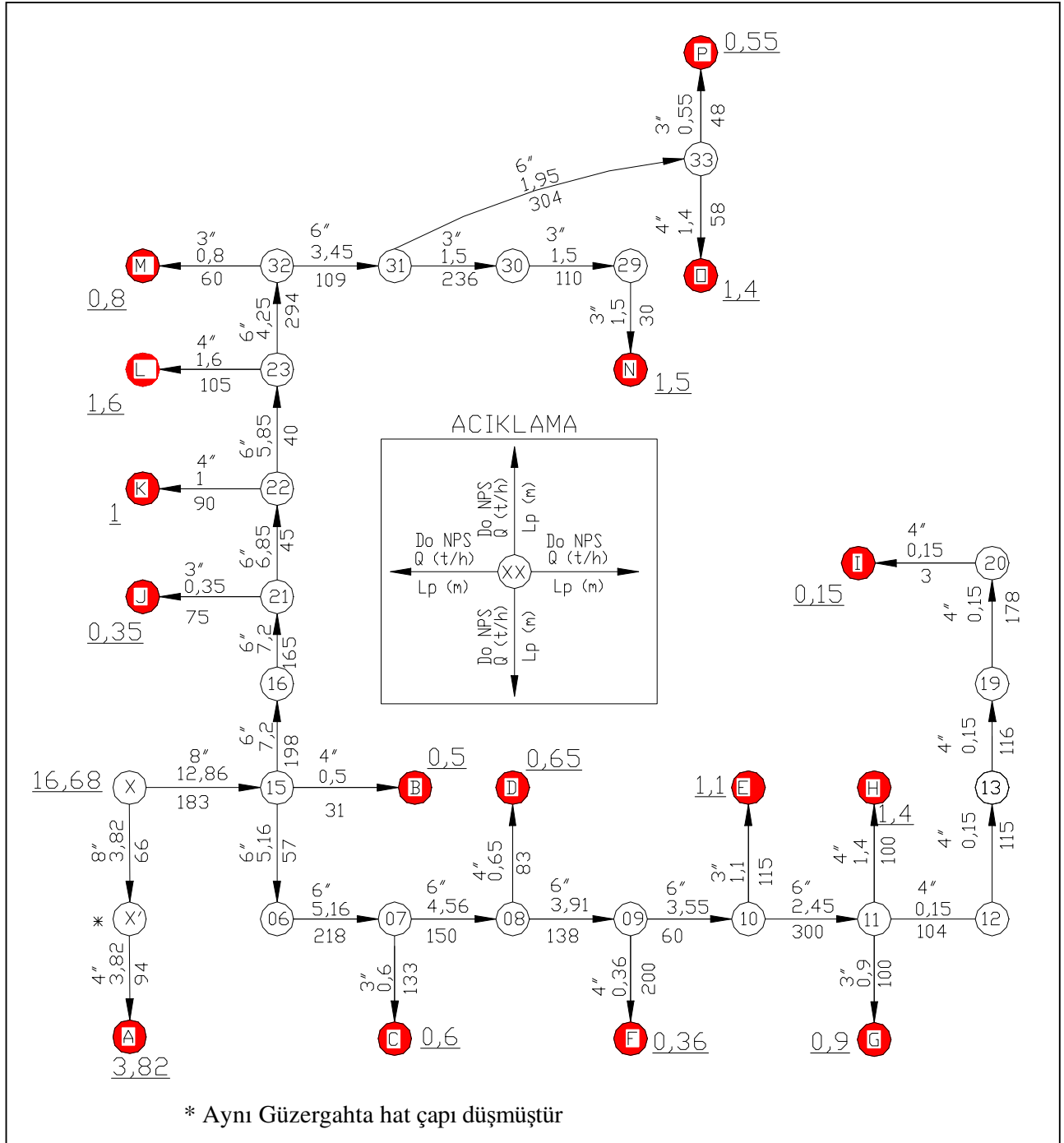
Şekil 5.19 Sadeleştirilmiş sonuç ağaç

Çizelge 5.23 Sonuç Network (Dağıtım Hattı) Tasarım Hesap Sonuçları ve Maliyet

1. Nokta	Ark	2. Nokta	Q (t/h)	Lp (m)	Dirsek (Adet)	Çap (DN)	P ₁ barG	dp bar	P ₂ barG	T ⁰ C	V (m/s)	RN	Ep (m)	BİRİM MALİYE T \$/m	HAT MALİYETİ \$
X	A _{X,06}	06	16,7	100	10	DN200	10,00	0,34	9,7	184	24,5	1,85E+12	219,20	257,15	25.715
06	A _{06,A}	A	3,82	153	16	DN100	9,66	0,68	9	183	23,6	843098	229,76	197,95	30.286
06	A _{06,07}	07	5,16	218	22	DN150	9,66	0,26	9,4	183	14	756027	402,52	229,64	50.062
07	A _{07,C}	C	0,6	133	13	DN40	9,40	1,44	8	182	23,7	343960	154,00	110,54	14.702
07	A _{07,08}	08	4,56	150	15	DN150	9,40	0,14	9,3	182	12,7	693813	275,47	229,64	34.446
08	A _{08,D}	D	0,65	83	9	DN40	9,26	1,06	8,2	181	26	373136	95,94	110,54	9.175
08	A _{08,09}	09	3,91	138	14	DN125	9,26	0,19	9,1	181	14,5	650156	231,65	211,61	29.202
09	A _{09,F}	F	0,36	200	20	DN32	9,07	1,77	7,3	180	19,9	231982	226,43	108,84	21.768
09	A _{09,E}	E	3,55	175	18	DN125	9,07	0,25	8,8	180	14,7	626324	295,27	211,61	37.032
E	A _{E,19}	19	2,45	376	38	DN125	8,82	0,26	8,6	179	10,4	450655	627,00	211,61	79.565
19	A _{19,I}	I	0,15	181	18	DN25	8,56	1,23	7,3	178	15,2	133347	197,57	106,16	19.215
19	A _{19,H}	H	2,3	171	17	DN100	8,56	0,31	8,3	178	15,8	531651	257,01	197,95	33.849
H	A _{H,G}	G	0,9	200	20	DN50	8,25	0,64	7,6	177	16,9	340524	254,91	152,32	30.464
06	A _{06,15}	15	7,7	57	6	DN150	9,66	0,15	9,5	183	20,9	1,13E+12	107,85	229,64	13.089
15	A _{15,B}	B	0,5	31	4	DN32	9,51	0,5	9	182	26,6	321815	34,99	108,84	3.374
15	A _{15,21}	21	7,2	363	36	DN150	9,51	0,84	8,7	182	19,9	1,06E+12	667,64	229,64	83.359
21	A _{21,J}	J	0,35	75	8	DN32	8,67	0,66	8	179	20,1	235523	85,58	108,84	8.163
21	A _{21,22}	22	6,85	45	5	DN150	8,67	0,11	8,6	179	20,5	1,05E+12	87,31	229,64	10.334
22	A _{22,K}	K	1	90	9	DN50	8,56	0,83	7,7	178	26	450417	109,97	152,32	13.709
22	A _{22,23}	23	5,85	40	4	DN150	8,56	0,07	8,5	178	17,7	897693	73,71	229,64	9.186
23	A _{23,L}	L	1,6	105	11	DN65	8,49	1,03	7,5	178	29,4	603841	135,6	154,86	16.260
23	A _{23,32}	32	4,25	294	29	DN150	8,49	0,26	8,2	178	12,9	652614	536,08	229,64	67.514
32	A _{32,M}	M	0,8	60	6	DN50	8,23	0,37	7,9	177	21,5	361581	73,25	152,32	9.139
32	A _{32,31}	31	3,45	109	11	DN100	8,23	0,46	7,8	177	24,4	800237	165,23	197,95	21.577
31	A _{31,N}	N	1,5	376	38	DN100	7,77	0,32	7,5	174	11,2	322636	564,84	197,95	74.429
31	A _{31,33}	33	1,95	304	30	DN100	7,77	0,43	7,3	174	14,5	419427	454,63	197,95	60.177
33	A _{33,O}	O	1,4	58	6	DN80	7,34	0,17	7,2	172	18,8	349069	79,51	158,5	9.193
33	A _{33,P}	P	0,55	48	5	DN80	7,34	0,16	7,2	172	16,3	203481	58,85	158,5	7.608
Toplam Maliyet														822.592	

Yukarıdaki Çizelgede, Şekil 5.18 de resmedilen dağıtım güzergahına göre belirlenen boru çapları ve buna göre ortaya çıkan her bir hattın maliyeti ile toplam güzergahın maliyetini görmekteyiz.. Sonuç olarak en optimum güzergah maliyeti 822.592 \$ (USD) ile en düşük maliyet olarak çıkmaktadır. Bu güzergaha ait belirlenen boru çapları, mesafe ve kapasitelerini gösteren sonuç akış diyagramı aşağıdadır.





Şekil 5.21 Mevcut güzergahın network modeli, boru hattı çapları, kapasite ve mesafeleri

Çizelge 5.24 Mevcut Dağıtım Hattına Ait Boru Çapları, Mesafeleri ve Maliyeti

Ark	Q (t/h)	Lp (m)	Dirsek (Adet)	Çap (DN)	BİRİM MALİYET \$/m	HAT MALİYETİ \$
A _{X,X'}	3,82	66	7	DN200	257,15	16.972
A _{X',A}	3,82	94	10	DN100	197,95	18.607
A _{X,15}	12,86	183	19	DN200	257,15	47.058
A _{15,06}	5,16	57	6	DN150	229,64	13.089
A _{06,07}	5,16	218	22	DN150	229,64	50.062
A _{07,C}	0,6	133	13	DN80	158,5	21.081
A _{07,08}	4,56	150	15	DN150	229,64	34.446
A _{08,D}	0,65	83	9	DN100	197,95	16.430
A _{08,09}	3,91	138	14	DN150	229,64	31.690
A _{09,F}	0,36	200	20	DN100	197,95	39.590
A _{09,10}	3,55	60	6	DN150	229,64	13.778
A _{10,E}	1,1	115	12	DN80	158,5	18.228
A _{10,11}	2,45	300	18	DN150	229,64	68.892
A _{11,H}	1,4	100	17	DN100	197,95	19.795
A _{11,G}	0,9	100	10	DN80	158,5	15.850
A _{11,I}	0,15	516	52	DN100	197,95	102.142
A _{15,B}	0,5	31	4	DN100	197,95	6.136
A _{15,21}	7,2	363	36	DN150	229,64	83.359
A _{21,J}	0,35	75	8	DN80	158,5	11.888
A _{21,22}	6,85	45	5	DN150	229,64	10.334
A _{22,K}	1	90	9	DN100	197,95	17.816
A _{22,23}	5,85	40	4	DN150	229,64	9.186
A _{23,L}	1,6	105	11	DN100	197,95	20.785
A _{23,32}	4,25	294	29	DN150	229,64	67.514
A _{32,M}	0,8	60	6	DN80	158,5	9.510
A _{32,31}	3,45	109	11	DN150	229,64	25.031
A _{31,N}	1,5	376	38	DN80	158,5	59.596
A _{31,33}	1,95	304	30	DN150	229,64	69.811
A _{33,O}	1,4	58	6	DN100	197,95	11.481
A _{33,P}	0,55	48	5	DN80	158,5	7.608
Toplam Maliyet						937.764

Mevcut Hattın Yatırım Maliyeti (4.511m) 937.764 USD

Optimizasyon Yapılmış Hattın Yatırım Maliyeti (4.333 m) 822.592 USD

Fark 115.172 USD

Optimizasyona Göre Fark %14,001

Optimizasyonsuz Duruma Göre Fark %12,28

Yukarıdaki Çizelgede hesaplamalar sonucu , mevcut hat maliyetinin **937.764 \$ (USD)** mal olduğunu görülmektedir.

Bu durumda, Optimizasyon yapılmış olan hat maliyeti olan **822.592 \$ (USD)** ile arasında **115.172 \$** fark olmaktadır. Böylece da optimizasyon yapılması durumunda, toplam yatırım maliyetinde yaklaşık **%12-14** 'lük bir kazancın sağlanabileceği sonucunu görmekteyiz.

Optimizasyon yapılmış olan ve herhangi bir optimizasyon yapılmadan kurulmuş olan mevcut güzergah ve boru hattı dağıtımlarlarına esas teşkil eden branşmaların boru çapları ve metrajlarının karşılaştırılmalarına ait hazırlanan çizelge aşağıda verilmektedir. Buna göre optimizasyonun, yapılacak yatırımlarda sağlayacağı kazançlar karşılaştırılabilmektedir.

Çizelge 5.25 Mevcut Dağıtım Hattı ve Optimizasyonu Yapılmış Hattın Branşmanlarının Karşılaştırılması

Boru hattı Çapı (Do)	Mevcut Hat (m)	Optimizasyon Yapılmış Hat (m)
DN25	-	181
DN32	-	306
DN40	-	216
DN50	-	350
DN65	-	105
DN80	907	106
DN100	1277	1113
DN125	-	689
DN150	2078	1167
DN200	249	100
TOPLAM	4.511	4.333

KAYNAKLAR

Ahlatçioğlu, M., Tiryaki, F.,(1998) “Kantitatif Karar Verme Teknikleri”Yıldız Teknik Üniversitesi Yayınları,İstanbul, 1-43

Derbentli, T., (1998) “Bölgesel Isıtma ve Kojenerasyonun Ekonomik Olurluğu, Bölgesel Isıtma ve Kojenerasyon Konferansı Bildiriler Kitabı”59,69, TMMOB, İstanbul

Hepbaşlı, A., (2001) “Performance Evaluation Criteria For Cogeneration Systems and Industrial Energy Efficiency Regulations in Turkey”,141-151, ICCI Bildiriler Kitabı İstanbul

Horlock, J. H. (1997) “Cogeneration-Combined Heat and Power” (CHP): thermodynamics and dynamics”, Krieger Pub, Malabar.

Ignizio, J.P. (1982) “Linear Programming in Single & Multiple Objective Systems” Prentice-Hall, Inc. 279-369

ITT Grinnel Industrial Piping Inc., “Piping Design and Engineering” (1976) Fifth Edition, 68-69

Kartchenko, N.V., (1998) “Advanced Energy Systems”, TaylorFrancis, Washington.

Lindberg, A ., (1999) “Latest Development in Reciprocating Engine Driven Cogeneration Plants”, 95-102,102 ICCI 1999 Bildiriler Kitabı İstanbul.

Navyar,M., (2000) “Piping Handbook” McGraw-Hill Companies, Inc., Newyork, USA Chapter C3

Orlando, A. J., (1999) “Cogeneration Design Guide”, ASHRAE, Atlanta, Georgia, USA

The European Association for the Promotion of Cogeneration,(2001) “A Guide To Cogeneration, March 2001” Brussels, Belgium, (www.cogen.org)

UNESCAP, (1998), “ Promotion of Cogeneration Technology as a Means of Pollution Control and Increase in Energy Efficiency in Industrial and Commercial Sectors”, United Nations Publications.

Van Laan, T.J., Smith P.R., “Piping and Pipe Support Systems Design and Engineering” McGraw-Hill Companies,

Wilkinson,W.B.,Barnes,W.R. (1980) “Cogeneration of Electricity and Useful Heat” CRC Press, Inc.212-215

İNTERNET KAYNAKLARI

www.tlv.com (Pocket SE1 Version 3.03 Steam System Design Software 9/01/2002)

EKLER

- Ek 1 $Q=0,1$ t/h ve 20 t/h arası kapasiteli hatların, 10 m –100 m arası mesafelerde
dp=0,5 bar basınç düşümü ile taşıyabilecekleri kapasiteler
- Ek 2 $Q=0,1$ t/h ve 20 t/h arası kapasiteli hatların, 150 m –600 m arası mesafelerde
dp=0,5 bar basınç düşümü ile taşıyabilecekleri kapasiteler

Ek 1 Q=0,1 - 20 t/h arası kapasiteli hatların, 10 m –100 m arası mesafelerde dp=0,5 bar basınç düşümü ile taşıyabilecekleri kapasiteler

[illegible]

Ek 2 Q=0,1 - 20 t/h arası kapasiteli hatların, 150 m –600 m arası mesafelerde $dp=0,5$ bar basınç düşümü ile taşıyabilecekleri kapasiteler

[illegible]

ÖZGEÇMİŞ

Doğum tarihi 22.08.1971

Doğum yeri Isparta

Lise 1982-1988 Yalova Lisesi

Lisans 1988-1995 Yıldız Teknik Üniversitesi Makine Fakültesi
Enerji Makinaları Bölümü

Yüksek Lisans 1996-2006 Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Müh. Anabilim Dalı, Enerji Makinaları Programı

Çalıştığı kurumlar

1995-1998 Panel Doğal Gaz Ltd. Şti.
1999-2001 Enkay Oto Lift İmalat Sanayii Ltd. Şti.
2001-2005 Teknopro A.Ş. (Akenerji A.Ş. bünyesinde)
2005-Devam ediyor Aktops Tekstil A.Ş.