

**BAŞKENT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**TÜRKİYE’DE BASINÇLI HAVA ORTAMINDA ENERJİ
DEPOLAMASININ OLURLUĞUNUN TEKNİK VE
ÇEVRESEL İNCELENMESİ**

MEHMET CENAN

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ANKARA

NİSAN, 2013

**TÜRKİYE’DE BASINÇLI HAVA ORTAMINDA ENERJİ
DEPOLAMASININ OLURLUĞUNUN TEKNİK VE
ÇEVRESEL İNCELENMESİ**

**TECHNICAL AND ENVIRONMENTAL INVESTIGATION OF
ENERGY STORAGE IN COMPRESSED AIR IN TURKEY**

MEHMET CENAN

Başkent Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin
Enerji Mühendisliği Anabilim Dalı İçin Öngördüğü
YÜKSEK LİSANS TEZİ
olarak hazırlanmıştır.
NİSAN, 2013

“Türkiye’de Basınçlı Hava Ortamında Enerji Depolamasının Olurluğunun Teknik ve Çevresel İncelenmesi” başlıklı bu çalışma, jürimiz tarafından, 24/04/2013 tarihinde, **ENERJİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI 'nda YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Başkan (Danışman) :
Prof.Dr. Birol Kılış

Üye :
Prof.Dr. Tahir Yavuz

Üye :
Öğr.Gör.Dr. Özgür Erol

ONAY

/ /2013

Prof. Dr. Emin AKATA
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

TEŐEKKÖR

Başkent Üniversitesi Enerji Mühendisliği Bölümü Anabilim Dalı'nda yapmış olduğum Yüksek Lisans çalışmamda bilgi ve tecrübeleriyle beni yönlendiren, çalışmalarımın sağlıklı yürümesine yardımcı olan değerli hocam Sayın Prof. Dr. Birol Kılış hocama, kendisinin yurtdışı görevi esnasında değerli fikirlerini benimle paylaşarak çalışmalarına katkıda bulunan Sayın Prof. Dr. Tahir Yavuz hocama, Enstitü Müdürümüz Sayın Prof. Dr. Emin Akata hocama ve dersler süresince değerli bilgilerini bizimle paylaşan diğer tüm bölüm hocalarıma teşekkür ederim.

Sabır, anlayış ve desteklerinden dolayı işyerimdeki yöneticilerime ve iş arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Yüksek lisans dersleri boyunca bilgi ve birikimlerini bizimle paylaşan değerli bölüm hocalarıma teşekkür ederim.

Hayatım boyunca maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen sevgili aileme, kıymetli hayat arkadaşıma ve şu an bir buçuk yaşında olan canım oğluma tüm sabır ve desteklerinden dolayı teşekkür ederim.

ÖZ

TÜRKİYE'DE BASINÇLI HAVA ORTAMINDA ENERJİ DEPOLANMASININ OLURLUĞUNUN TEKNİK VE ÇEVRESEL İNCELENMESİ

Mehmet Cenân

Başkent Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

Enerji Mühendisliği Anabilim Dalı

Enerjinin istendiği zaman ve istenilen yerde kullanılmaya hazır olması istenir. Enerjiyi istediğimiz zaman kullanabilmek için onu saklamaya depolama denir. Enerjiyi çok değişik formlarda depolama yöntemleri bulunmaktadır. Bu çalışma kapsamında enerji depolama ve enerji depolama yöntemlerinin teorik olarak araştırılması planlanmıştır. Bu çalışmada başlıca enerji depolama yöntemlerinden biri olan basınçlı hava enerji depolama yöntemi ele alınmış olup, uygun bir tuz domu ortamında üç ayrı sistem üzerinde termodinamik ve ekonomik çalışmalar yapılarak sistemlerin kıyaslaması ortaya konmuştur. Yapılan hesaplamalar doğrultusunda kompresörlerin verimleri; DB için 0,79, OB için 0,83 ve YB için 0,83, türbinlerin verimlerinde DB için 0,79 ve YB için 0,83 olarak hesaplanmış ve her üç sistem içinde aynı veriler değerlendirilmiştir. Toplam sistem verimleri çalışması kapsamında ısı depolu sistemin 0,39'luk verim ile 0,33'lük verime sahip geleneksel ve 0,34'lük verime sahip gaz türbinli sisteme göre daha verimli olduğu ortaya konmuştur. Toplam yatırım maliyetleri, finansman ve amortisman giderleri değerlendirmesi sonucunda sistem verimi olarak en yüksek olan ısı depolu sistemin 4,6 yıllık bir geri ödeme süresi ile en ekonomik sistem olduğu hesaplanmıştır. Ekonomik analiz çalışması kapsamında geleneksel sistemin geri ödeme süresi 5,5 yıl, gaz türbini ile kombine çalışan sisteminde 4,9 yıl olduğu ortaya çıkmaktadır. Yıllık 40 çevrim esasına göre yapılan hesaplamalarda her üç sisteminde ortalama yıllık 160 milyon TL'lik bir kâr sağladığı ortaya konmuştur.

Anahtar Sözcükler: Basınçlı hava, kaverna, tuz domu, elektrik, enerji depolama

Danışman: Prof. Dr. Birol Kılıkş, Başkent Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü.

ABSTRACT

TECHNICAL AND ENVIRONMENTAL INVESTIGATION OF ENERGY STORAGE IN COMPRESSED AIR IN TURKEY

Mehmet Cenan

Başkent University, Institute of Science and Engineering

Energy Engineering Graduate Program

Energy is required to be ready for use at any time and at any desired place. Energy storages called when we want to keep it for use. There are many different forms of energy storage methods. Scope of this study was to investigate the theoretical energy storage and energy storage methods. In this study, the main energy storage, compressed air energy storage method, which is one of the methods are discussed and a salt dome in accordance with the thermodynamic and economic studies done on the system in three different comparison systems have been introduced. The efficiency of the compressors according to the calculations, LP 0.79, 0.83 for IP and HP 0.83 for the turbines to LP efficiencies calculated as 0.79 and 0.83 for HP and the data was analyzed in each of the three systems. Total system with heat storage system under study yields 0.39 efficiency with a yield of 0.33 and 0.34 yield the traditional yield is more efficient than gas turbine system have been revealed. Total investment cost, financing and depreciation costs as a result of evaluation of efficiency of the system as a heat storage system, which is the highest with a payback period of 4.6 years is estimated to be the most economical system. Under the traditional system of economic analysis, payback period of 5.5 years of operation of the gas turbine is combined with a working system to be 4.9 years. Each of the three cycle system of calculations made on the basis of 40 cycle the average annual profit of \$ 160 million that has been provided.

Keywords: Energy storage, salt dome, compressed air, energy

Advisor: Prof. Dr. Birol Kilkis, Baskent University, Department of Mechanical Engineering.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZ.....	i
ABSTRACT.....	ii
İÇİNDEKİLER.....	iii
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	v
ÇİZELGELER LİSTESİ.....	vi
GRAFİKLER LİSTESİ.....	vii
RESİMLER LİSTESİ.....	viii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ.....	ix
1 GİRİŞ.....	1
2 AMAÇ.....	3
3 ELEKTRİK DEPOLANABİLİRMİ.....	4
4 ENERJİ DEPOLAMA.....	4
5 ENERJİ DEPOLAMA NEDENLERİ.....	7
6 MEVCUT ENERJİ DEPOLAMA TEKNOLOJİLERİ.....	8
7 BASINÇLI HAVA DEPOLAMALI ELEKTRİK SANTRALLERİ.....	9
7.1 BHED Santrallerinin Çalışma Prensibi.....	11
7.2 Mevcut ve Planlanmakta Olan BHED Santralleri.....	12
7.2.1 Huntorf Santrali.....	12
7.2.2 McIntosh Santrali.....	14
7.2.3 Norton Santrali.....	15
7.2.4 Iowa depolanmış enerji parkı.....	16
7.3 BHED Uygulamaları için Depolama İmkanları.....	17
7.3.1 Tuz oluşumları.....	17
7.3.2 Sert kaya oluşumları.....	17
7.3.3 Gözenekli kaya oluşumları.....	18
8 DEPOLAMA İÇİN KAYA TUZUNUN TERCİH EDİLMESİ.....	18
9 ÇÖZELTİ MAĞDENCİLİĞİ TEKNOLOJİLERİNİN ÖZETİ.....	19
10 BHED SİSTEMLERİNİN EKONOMİK YÖNDEN ÖNEMİ.....	20
10.1 Sistemler İçin Seçilen Yerin Konumu.....	21

10.2	BHED İçin Yer Seçimi.....	23
10.3	Sistem Kapsamındaki Kavernaların Konumu.....	24
10.4	Eritme (Liç) İstasyonu.....	25
10.5	Eritme Yöntemleri.....	26
10.6	Kavernalar.....	28
10.7	Kaverna risk senaryoları.....	30
11	SİSTEM PARAMETRELERİ VE DETAYLARI.....	33
11.1	Performans İndeksleri.....	35
11.2	Ekonomik Analiz Parametreleri.....	37
12	TERMODİNAMİK PARAMETRELER VE SİSTEM ANALİZLERİ.....	40
12.1	Geleneksel Basıncılı Hava Enerji Depolama Sistemi.....	44
12.2	Isı Depolu Basıncılı Hava Enerji Depolama Sistemi.....	56
12.3	Gaz Türbini İle Kombine Çalışan Basıncılı Hava Depolama Sistemi.....	63
13	SİSTEMLERİN EKONOMİK ANALİZLERİ.....	69
13.1	Geleneksel Sistemin Ekonomik Analizi.....	69
13.2	Isı Depolu Sistemin Ekonomik Analizi.....	73
13.3	Gaz Türbini ile Kombine Çalışan Sistemin Ekonomik Analizi.....	77
14	SİSTEMLERİN TERMODİNAMİK VE EKONOMİK KARŞILAŞTIRILMASI.....	81
15	SİSTEMLERİN ÇEVREYLE ETKİLEŞİMİ VE KARBON ANALİZLERİ.....	83
16	SONUÇ.....	87
	KAYNAKLAR.....	89
	EK-1 Havanın İdeal Gaz Özellikleri.....	93

ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1	Büyük Ölçekli Bir Depolama Tesisinin Yük Profili.....	4
Şekil 2	Depolama Teknolojilerinin Karşılaştırılması.....	6
Şekil 3	Enerji Depolama Sistemleri.....	8
Şekil 4	McIntosh Santralının Sistem Gösterimi.....	15
Şekil 5	Kavernalar için Avrupa - Orta Asya Tuz Yataklarının Gösterimi.....	19
Şekil 6	Tarsun Yeraltı Depolama Projesi Yer Bulduru Haritası	21
Şekil 7	Önerilen Proje Alanının ve Yakın Çevresinin Uydu Görüntüsü	22
Şekil 8	Proje Sahası ve Tatlı Suyun Alınacağı Nehrin Uydu Görüntüsü.....	22
Şekil 9	Yeraltı Tuz Yataklarında Oluşturulan Kavernaların Genel Gösterimi.....	23
Şekil 10	Kavernaların Yeraltı Gösterimi.....	25
Şekil 11	Kavernaların Yerleşimi.....	26
Şekil 12	Doğrudan Sirkülasyonda Eritme İşlemi Diyagramı.....	27
Şekil 13	Ters Sirkülasyonda Eritme İşlemi Diyagramı.....	27
Şekil 14	Geleneksel Sistemin Genel Gösterimi.....	44
Şekil 15.1	Geleneksel Sistemde Basınçlandırma İşleminin Gösterimi.....	47
Şekil 15.2	Geleneksel Sistemde Basınçlandırma İşleminin Gösterimi.....	47
Şekil 16	Geleneksel Sistemde Üretim İşleminin Gösterimi.....	48
Şekil 17	Isı Depolu Sistemin Genel Gösterimi.....	56
Şekil 18	Isı Depolu Sistemde Basınçlandırma İşleminin Gösterimi.....	56
Şekil 19	Isı Depolu Sistemde Üretim İşleminin Genel Gösterimi.....	58
Şekil 20	Isı Deposunun Genel Görünümü.....	57
Şekil 21	Gaz Türbini İle Kombine Çalışan Sistemin Genel Gösterimi.....	64
Şekil 22	Gaz Trb. İle Kombine Çalışan Sistemde Basınçlandırmanın Gösterimi..	65
Şekil 23	Gaz Trb. İle Kombine Çalışan Sistemde Üretim İşleminin Gösterimi.....	65

ÇİZELGELER LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 1	Huntorf Santralinin Genel Özellikleri.....	13
Çizelge 2	Huntorf ve McIntosh Santrallerinin Teknik Verileri.....	15
Çizelge 3	Çeşitli Enerji Santrallerinin Termal Verimleri	17
Çizelge 4	Geleneksel Sistemin Basınçlandırma İşletme Verileri.....	54
Çizelge 5	Geleneksel Sistemin Üretim Operasyon Verileri.....	55
Çizelge 6	Isı Depolu Sistemin Basınçlandırma Operasyon Verileri	62
Çizelge 7	Isı Depolu Sistemin Üretim Operasyon Verileri.....	62
Çizelge 8	Gaz Trb. İle Kombine Çalışan Sistemin Basınçlandırma Verileri.....	69
Çizelge 9	Gaz Trb. İle Kombine Çalışan Sistemin Üretim Operasyon Verileri...	69
Çizelge 10	Geleneksel Sistemin Ekipman Maliyetleri.....	69
Çizelge 11	Geleneksel Sistemde On Yıllık Amortisman Dağılımı.....	70
Çizelge 12	Geleneksel Sistemin Toplam Yatırım Maliyeti.....	70
Çizelge 13	Isı Depolu Sistemin Ekipman Maliyetleri.....	73
Çizelge 14	Isı Depolu Sistemde On Yıllık Amortisman Dağılımı.....	74
Çizelge 15	Isı Depolu Sistemin Toplam Yatırım Maliyeti.....	74
Çizelge 16	Gaz Trb. İle Kombine Çalışan Sistemin Ekipman Maliyetleri.....	77
Çizelge 17	Gaz Trb. İle Kombine Çalışan Sistemde Amortisman Dağılımı.....	77
Çizelge 18	Gaz Trb. İle Kombine Çalışan Sistemin Toplam Yatırım Maliyeti.....	78
Çizelge 19	Sistemlerin Termodinamik Analiz Gösterimi.....	81
Çizelge 20	Sistemlerin Ekonomik Analiz Gösterimi.....	82
Çizelge 21	Sistemlerin Çevre Uyumu.....	83

GRAFİKLER LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Grafik 1 Geleneksel Sistemin Ekipman Maliyet Dağılımı.....	69
Grafik 2 Geleneksel Sistemin Ekonomik Analiz Gösterimi.....	72
Grafik 3 Isı Depolu Sistemin Ekipman Maliyet Dağılımı.....	73
Grafik 4 Isı Depolu Sistemde Ekonomik Analiz Gösterimi.....	76
Grafik 5 Gaz Türbini İle Kombine Çalışan Sistemin Ekipman Maliyet Dağılımı....	78
Grafik 6 Gaz Türbini İle Kombine Çalışan Sistemin Ekonomik Analiz Gösterimi..	80
Grafik 7 Her Üç Sistemin Giren Ekserji ve Ekserji Yıkımları.....	85
Grafik 8 Sistemlerin Karbon Salım Karşılaştırmaları.....	86
Grafik 9 Sistemlerin Karbon Salım Getiri Karşılaştırmaları.....	86

RESİMLER LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Resim 1 Huntorf Santralinin Genel Görünümü.....	13
Resim 2 McIntosh Santralinin Genel Görünümü.....	14
Resim 3 Norton Santralinin Genel Görünümü.....	16
Resim 4 Iowa Santralinin Genel Görünümü.....	16

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

$\varnothing$	Çap, m
MW	Megawatt
K	Kelvin
kJ	Kilojul
kWh	Kilowatt saat
\$	US Dolar
M	Motor
G	Jeneratör
N	Kredi süresi
i	Faiz
R	Gaz sabiti, hava için 287,058 J/kgK
T_{cavern}	Kaverna sıcaklığı, K
V_{cavern}	Kaverna hacmi, m^3
ε	Epsilon
γ	Gamma oranı (c_p / c_v)
c_p	Spesifik sıcaklık (sabit basınçta)
ψ	Akış ekserjisi
T	Salt sıcaklık, K
T_0	Referans sıcaklığı (295 K)
P	Salt basınç
P_0	Referans salt basınç (99 kPa)
k	Gazın spesifik ısı oranı
c_v	Spesifik sıcaklık (sabit hacimde)
V_0	İlk yatırım maliyeti
$\dot{w}_{in}$	Hacim içerisine basılan hava debisi, kg/s
$\dot{w}_{out}$	Hacim içerisinden çekilen hava debisi, kg/s
W_{net}	Toplam iş, kW_h
$\dot{m}_{hava}$	Hava debisi, kg/s
r_{exp}	Türbin genleşme oranı

r_c	Kompresör basınç oranı
f_{cc}	Yanma odası basınç düşümü
$\eta_{izentropi}$	Kompresör ve türbinlerin izentropik verimi, %
η_M	Motor verimi, %
η_G	Jeneratör verimi, %
η_{th}	Termal verim, %
$Ex_{yıkımı}$	Ekserji yıkımı, kW _h
Ex_g	Giren ekserji, kW _h
$Ex_ç$	Çıkan ekserji, kW _h
$W_{total,out}$	Toplam çıkan iş, kW _h
$W_{total,in}$	Toplam giren iş, kW _h
E_{YBT}	Yüksek basınç türbinin ekserjisi, kW _h
E_{DBT}	Düşük basınç türbinin ekserjisi, kW _h
E_{YBK}	Yüksek basınç kompresörün ekserjisi, kW _h
E_{DBK}	Düşük basınç kompresörün ekserjisi, kW _h
BHED	Basınçlı hava enerji depolama
ANCF	Yıllık net nakit akışı
CIT	Kompresör giriş sıcaklığı, K
COT	Kompresör çıkış sıcaklığı, K
DR	İndirim oranı
EPR	Enerji Üretim Oranı
YB	Yüksek Basınç
OB	Orta Basınç
LHV	Alt ısı değer
DB	Alçak basınç
MW _h	Megawatt saat
O&M	Operasyon ve bakım
SFC	Spesifik yakıt tüketimi
TIT	Türbin giriş sıcaklığı, K
TOT	Türbin çıkış sıcaklığı, K

1. GİRİŞ

Günlük hayatın temel ihtiyaçlarından birisi enerjidir. Günlük yaşamın içerisinde enerjinin kullanılmadığı herhangi bir saha yoktur. Günümüzde enerji kullanımı toplumlar için gelişmişlik ölçütü olarak kullanılmaktadır. Özellikle elektrik ve ısı enerjisinin hayatımızda önemli bir yeri vardır. Sınırlı doğal kaynaklardan elde edilen bu enerjiler, talep artışına bağlı olarak daha değerli hale gelmektedirler.

Günümüzde, artan nüfus ve sanayileşmeden kaynaklanan enerji ihtiyacı ülkemizin kısıtlı kaynaklarıyla karşılanamamakta, enerji üretimi ve tüketimi arasındaki fark hızla büyümektedir. Bu durumda, mevcut enerji kaynaklarımızdan daha etkili bir biçimde yararlanmak giderek artan bir önem kazanmaktadır. Enerji talebindeki hızlı artışın karşılanması için, yenilenebilir enerji kaynaklarından elde edilen enerjinin verimli bir şekilde depolanması ve ihtiyacı karşılayacak en uygun dönüşümlerin geliştirilmesi yararlı olacaktır.

Alternatif enerji kaynaklarının birçoğu doğa koşullarına son derece bağımlı durumdadır. Bu nedenle bu kaynaklar ile üretilen enerji sezonluk, günlük ve hatta anlık olarak bile büyük değişimler gösterebilmektedir. Bu durum da üretilen enerjinin genel enerji talebi ile tam olarak örtüşmemesine neden olabilmektedir. Bu açıdan, yükün enerji ihtiyacının her durumda başarı ile karşılanabilmesi için enerji depolama üniteleri oldukça büyük öneme sahiptirler. Bahsi geçen alternatif kaynaklardan üretilen fazla enerji farklı tür enerji depolama ünitelerine aktarılmakta, depolanan bu enerji ise ana kaynakların mevcut olmadığı ya da yetersiz olduğu durumlarda yük talebinin karşılanmasında kullanılmaktadır.

Enerji talebindeki hızlı artışla birlikte daha da ciddi boyutlara ulaşmakta olan puant yükün karşılanması sorununun çözümü için sıkıştırılmış hava depolu sistemler ile ilgili projeler geliştirilmelidir.

Teknik değerlendirmeler ve fizibilite çalışmaları enerji depolamanın sadece teknik bir gereklilik değil aynı zamanda maliyet kontrolü sağladığını da göstermektedir.

Enerji depolama ile, bir yandan enerjinin kullanıldığı alanlarda oluşan atık enerjiyi depolama, diğer yandan, yalnız belirli zamanlarda enerji verebilen yenilenebilir enerji kaynaklarının enerjisini depolayarak, enerji temin zamanı ile talebi arasında doğabilecek farkı gidermeye amaçlamaktadır. Ülkemizde ve Dünyada enerji kaynaklarının sınırlı olması ve giderek azalması sonucunda yenilenebilir enerji kaynakları ve üretilen enerjinin depolanması çok büyük önem arz etmektedir.

Bu tez çalışması kapsamında ülkemizin enerji politikalarına katkı sağlaması düşünülen depolama sistemlerinden olan basınçlı hava ile enerji depolama konusu çalışılmıştır. Bu çalışmada uygun depolama imkanı sağlayabilecek jeolojik yapıya sahip pilot bir bölgede geleneksel, ısı depolu ve gaz türbini ile kombine çalışan üç ayrı basınçlı hava enerji depolama sistemi değerlendirilmiş olup yapılan termodinamik ve ekonomik analizler sonucunda her üç sistemin değerlendirilmesi yapılmıştır.

Ülkemizde özellikle Adana, Mersin, Beypazarı, Tuzgölü, Çankırı, Kırıkkale, Trakya, İç Ege ve Batı Akdeniz bölgelerindeki tuz domu potansiyellerinin varlığı, enerji arz güvenliği kapsamında bu tür çalışmaların yapılmasını zorunlu kılmaktadır.

Bu tez çalışması ile çözeltili madencilik ve bu yöntemle tuz yataklarında basınçlı hava depolama yöntemi ile elektrik üretimi konularındaki literatür boşluğunun doldurulması, çözeltili madenciliklerinin açık bir dille ve temelleriyle ortaya konulması ve proses sonucu ortaya çıkan depolama imkânları kapsamında enerji ve enerji hammaddeleri depolama hakkında genel bilgilerin verilmesi amaç edinilmiştir. Ayrıca bu çalışmanın daha önce yapılmış çalışmalar ve standartlar açısından, literatüre katkısı olacağı düşünülmektedir.

2. AMAÇ

Enerji arz güvenilirliğini garanti edecek politikalar geliştirilirken; dışa bağımlılığın azaltılması, yenilenebilir enerji kaynaklarının daha verimli kullanılmasının sağlanması, emisyonların azaltılması, bunun yanında kesintili enerji kaynaklarının sisteme bağlanabilmesi için gerekli olacak olan ilave iletim hattı yatırım maliyetleri ve yedek güç yatırım maliyetlerinin azaltılması, minimum yükün maksimum yüke oranının yükseltilmesi için elektrik depolama tesislerinin sisteme ilave edilmesinin önemini ortaya koymaktadır.

Elektrik talebinin ve fiyatın düşük olduğu saatlerde termik santrallardaki fazla enerji veya aynı saatlerde oluşan kesintili enerji kaynaklarından elde edilecek elektrik kullanılarak depo doldurulurken minimum yük yukarı çekilmekte talebin fazla olduğu saatlerde ise elektrik üretilerek maksimum yük aşağı çekilerek minimum yükün maksimum yüke oranı artırılmaktadır. Puant yük değeri azaltılırken baz yük değerinin artırılması, puant yük dönemlerindeki tüketimin minimum tüketim dönemlerine kaydırılması ile sistem yük faktörü yükseltilmiş ve verimlilik artırılmış olmaktadır.

Basınçlı Hava Enerjisi Depolama bunu sağlayabilen, yani yüksek basınçlı hava şeklinde büyük miktarlarda yoğun olmayan elektrik enerjisi depolayan ve gerektiği zaman pik yükte elektrik üreten düşük maliyetli teknolojidir.

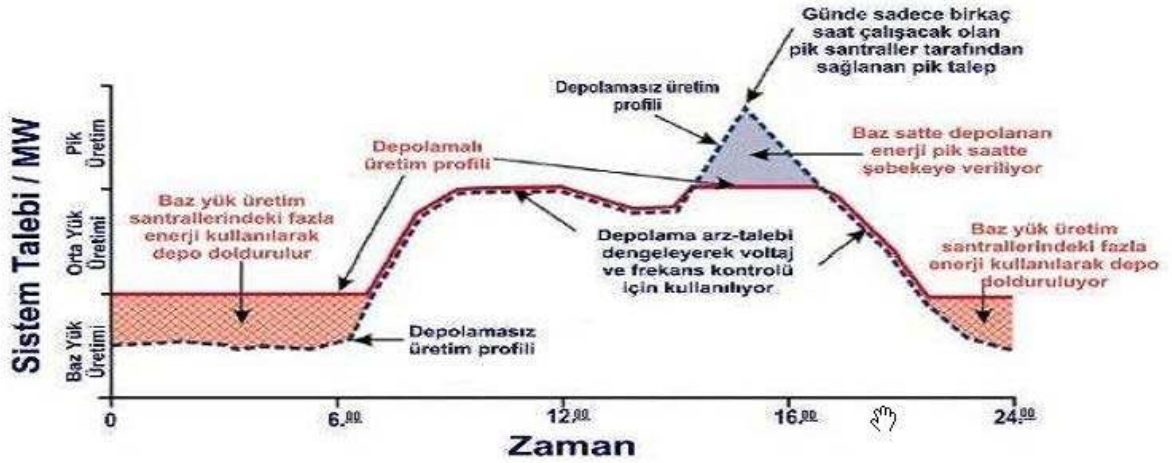
Bu araştırmanın amacı, yüksek miktarlarda yoğun elektrik enerjisini yüksek basınçlı hava şeklinde depolama kapasitesine sahip Basınçlı Hava Enerjisi Depolaması sistemlerinin tekno ekonomik analizini yapmaktır.

Bir sonraki adımda teknik incelemede önerilen farklı konfigürasyonların değerlendirmesinde depolama özellikleri ve üretim dizisi varyasyonlarının karlılık üzerindeki etkilerinin değerlendirilmesinde ekonomik analizler yapmak amaçlanmıştır.

3. ELEKTRİK DEPOLANABİLİR Mİ?

Elektrik formunda değil ancak ihtiyacın az fiyatın düşük ve enerjinin fazla olduğu saatlerde elektrik kullanılarak hava, su veya kimyasal formda depolanabilmekte ve ihtiyacın olduğu saatlerde en fazla birkaç dakika içerisinde elektriğe dönüştürülerek kullanıma sokulabilmektedir.

Hidrolik biokütle, konvansiyonel yakıtlar elektrik üretmeden önce depolanabilirken rüzgar, güneş ve dalga enerjisi elektrik formuna çevrildikten yani elektrik üretildikten sonra depolanmayı gerektirir. Yani rüzgar ve güneş gibi kesintili enerji kaynaklarında arz ve talebi eşleştirmek veya aynı ana denk getirmek bugünün teknolojisiyle mümkün değildir. Bu nedenle var oldukları anda ihtiyaç olmasa bile elektriğe dönüştürerek üretilen elektriği başka formlarda depolamak suretiyle ihtiyacın olduğu anlarda kullanılabilme olanağı yaratılmış olmaktadır. Aynı zamanda fosil yakıtlı elektrik santrallerin sistemdeki fazla olan enerjisi aynı yöntemlerle depolanarak kaynakların daha verimli kullanımı sağlanmış olmaktadır.



Şekil 1. Büyük Ölçekli Bir Depolama Tesisinin Yük Profili (Enerji Enstitüsü, 2011)

4. ENERJİ DEPOLAMA

Günümüzde modern enerji sistemleri arz güvenilirliği, sistem stablitesi, enerji kaynaklarının daha verimli kullanılması, iletim/dağıtım problemlerinin ve maliyetlerinin minimize edilmesi gibi birçok nedenlerle enerjinin depolanmasını zorunlu kılar. Elektrik üretim ve dağıtımında önemli olan güç eğrisini pürüzsüz bir şekle getirmektir. Akıllı şebekelerde bu dengeleme gerçek zamanlı dinamik olarak yapılabilmektedir. Akıllı sistemlerde hem dağıtılmış üretime hem de depolamaya ihtiyaç vardır.

Yenilenebilir enerji kaynaklarının tüketim merkezlerine uzak olması, düzenli olmaması ve hava tahminin yeteri kadar doğru yapılamaması nedeniyle, enerji depolama sistemlerinin geliştirilmesi ön plana çıkmıştır. Depolama olanaklarının artması yenilenebilir enerjiden daha fazla yararlanılmasına ve yenilenebilir kaynakların şebekeye daha fazla katkı vermesini sağlayacaktır.

Enerjinin elektrik olarak depolanması pahalıdır ve teknolojik olarak verimli değildir. Enerji depolama sistemlerinin bir çoğu dolaylı depolama sistemleridir. Diğer bir ifadeyle elektriğin diğer enerji formlarına dönüşümüdür. Enerjinin mekanik, kimyasal ve ısı olarak depolanması mümkündür. Buna yönelik çok sayıda teknoloji bulunmakla birlikte söz konusu teknolojilerin gelişmişlik düzeyleri farklılık göstermektedir. Depolama teknikleri uygulama alanlarına göre dört ana başlık altında sınıflandırılmaktadır:

- Yerleşim alanlarından uzak bölgelerde, güç çevirici ve acil durum terminallerinin beslenmesi için kullanılan "düşük güç seviyesi" uygulamaları
- Yerleşim alanlarından uzak bölgelerde bağımsız elektrik sistemleri için kullanılan "orta güç seviyesi" uygulamaları
- Şebeke bağlantı uygulamaları (peak dengeleme)
- Güç kalitesi kontrol uygulamaları

Yukarıda belirtilen ilk iki uygulama, enerjinin kinetik, kimyasal, basınçlı hava, hidrojen (yakıt pili), süper kapasitör ya da süper iletkenler aracılığıyla depolanabildiği "küçük ölçekli" sistemlere, son iki uygulama ise enerjinin yer çekimi enerjisi (hidrolik sistemler), ısı enerjisi, kimyasal enerji (akümülatör, akım pilleri) ya da sıkıştırılmış hava olarak depolandığı "büyük ölçekli" sistemlere yöneliktir.

Enerji depolama sistemleri kullanılan teknolojiye göre;

- Manyetik enerji (Süper kapasitörler)
- Elektrik enerjisi (Süper iletken manyetik enerji depolama)
- Mekanik enerji (Pompa depolamalı HES'ler, sıkıştırılmış hava depolama, volanlar)
- Kimyasal enerji (Bataryalar/piller, vs.)

olarak sınıflandırılabilir.

Pompa depolamalı HES'ler ve sıkıştırılmış hava depolama ile istenilen büyüklükte saatlik, günlük, haftalık veya mevsimlik depolamalar yapılabilmektedir. Bu santrallerden 20 MW'ın üzerinde kurulu güce sahip olanlar genellikle kısa dönem arz güvenliği, sistem stabilitesinin sağlanması ve frekans kontrolü gibi amaçlar için kullanılırken, küçük ölçekli olanları kesintili enerji kaynaklarının sistemi bozucu etkilerini azaltmak, süreklilik kazandırmak verimliliklerini ve pazarda rekabet gücünü artırabilmek için birlikte planlanmaktadır.

Depolama Teknolojisi	Avantajlar (Karşılaştırmalı)	Dezavantajlar (Karşılaştırmalı)	Güç (Uygulama)	Enerji (Uygulama)
Pompalı Depolama	Yüksek kapasite Düşük maliyet	Özel alan gereksinimi		
CAES	Yüksek kapasite Düşük maliyet	Özel alan gereksinimi Gaz yakıt gereksinimi		
PSB/VRB/ZnBr Aküler	Yüksek kapasite Bağımsız güç ve enerji verimliliği	Düşük enerji yoğunluğu		
Metal-Air Akü	Çok yüksek enerji yoğunluğu	Elektrik şarj zorluğu		
NaS Akü	Yüksek Güç ve Enerji Yoğunluğu Yüksek verimlilik	Üretim maliyeti Güvenlik konuları		
Li-ion Akü	Yüksek Güç ve Enerji Yoğunluğu Yüksek verimlilik	Yüksek üretim maliyeti Özel şarj çevrim gereksinimi		
Ni-Cd Akü	Yüksek Güç ve Enerji Yoğunluğu Yüksek verimlilik			
Diğer Gelişmiş Aküler	Yüksek Güç ve Enerji Yoğunluğu Yüksek verimlilik	Yüksek üretim maliyeti		
Kurşun Asit	Düşük ilk fiyat	Derin deşarjda kısıtlı çevrim sayısı		
Flywheels	Yüksek güç	Düşük enerji yoğunluğu		
SMES, DSMES	Yüksek güç	Düşük enerji yoğunluğu Yüksek üretim maliyetleri		
E.C. Capacitors	Uzun çevrim süresi Yüksek verimlilik	Düşük enerji yoğunluğu		

Şekil 2. Depolama Teknolojilerinin Karşılaştırılması (ESA, 2011)

Pompa depolamalı HES teknolojisi halen uygulanmakta olup, çoğunlukla 100 MW mertebelerindeki tesislerde kullanılmaktadır. Enerji talebinin düştüğü dönemlerde suyun yüksek seviyede bir rezervuara pompalanması, enerji talebinin arttığı dönemde de suyun alçak seviyedeki rezervuara aktarılırken enerji üretilmesi prensibine dayanmaktadır. Benzer şekilde, sıkıştırılmış hava depolama tekniğinde ise, elektrik fazlası ortamdaki havanın kompresör aracılığıyla sıkıştırılarak geçirimsiz bir ortamda (doğal ya da yapay boşluklar, tuz mağaraları, terkedilmiş madenler, vb.) depolanması için kullanılmakta, elektrik talebi arttığında ise söz konusu sıkıştırılmış hava ile türbinlerin çalıştırılarak elektrik üretilmesi sağlanmaktadır.

5. ENERJİ DEPOLAMANIN NEDENLERİ

Elektrik tesislerinde enerji depolama sistemleri denilince enerjiyi istenilen niteliklerde depolayan, bu niteliklerin bazılarının kaybolması veya kesintiye uğraması halinde ise, kullanıcıya istenilen niteliklerde enerji sağlanmaya devam

edilmesinde yardımcı olan sistemler akla gelmektedir. Enerjide istenilen başlıca nitelikler, sürekli, ucuz ve kaliteli olmasıdır.

Süreklilikten kasıt, istenildiği anda hizmet vermeye hazır olması, kesintiye uğrayıp, üretimde ve hizmetlerde çok daha büyük kayıplara sebebiyet vermemesidir. Kaliteli olması gerilim ve akımlarda salınım ve harmonikleri içermemesi demektir. Bu tür şebeke problemleri, bilindiği üzere, özellikle elektronik cihazlar üzerinde daha çok etkili olmakta, arızalanmalarına ve devre dışı kalmalarına, hasar görmelerine sebep olmaktadır. Bu tür şebeke kaynaklı gerilim dalgalanmaları ve problemleri neticesinde devre dışı kalan cihazın arıza bakım masraflarının ötesinde belki de çok daha büyük bir problem, ticari değere sahip hizmet ve üretim sektöründe yol açtığı kayıplardır.

Amerika Birleşik Devletleri'nden örnek verilecek olursa, bütün endüstrilerde yapılan bir tahmine göre sadece bir dakikalık kesinti dahi, özellikle bankacılık ve finans sektöründe saniyeler mertebesinde milyonlarca doların kaybolmasına neden olabilmektedir.

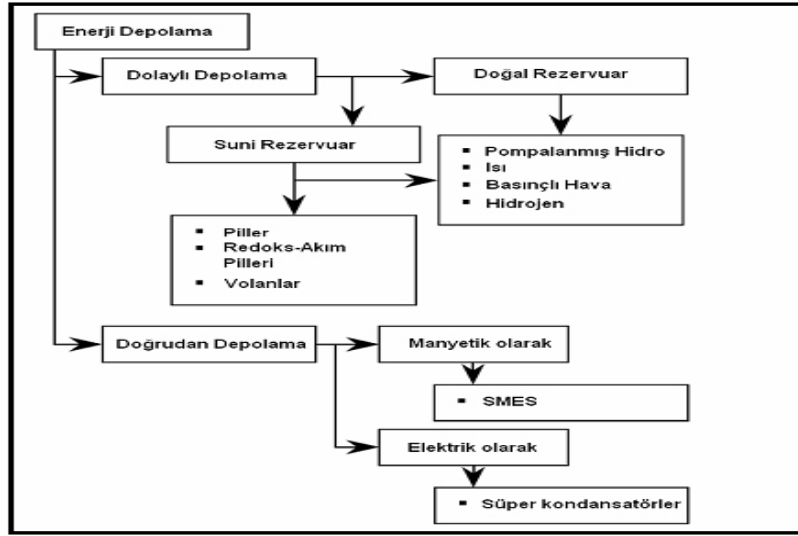
Elektrik enerjisinde ve enerji kaynaklarında istenen diğer ortak özellik ise ucuz olmasıdır. Bu tamamen kaynak enerjinin bolluğu, üretim, iletim ve dağıtım tesis yapısı ile alakalıdır.

Buradan da anlaşılacağı üzere süreklilik, kalite, kullanılabilirlik ve ucuzluk gibi nedenlerden dolayı enerji depolama çağdaş toplumlar için birer zorunluluk haline gelmiştir.

6. MEVCUT ENERJİ DEPOLAMA TEKNOLOJİLERİ

Enerji depolaması konusunda uygulama yeri ve özelliklerine göre değişik depolama teknolojileri geliştirilmiştir. Enerji depolama sistemleri elektriğin doğrudan veya başka enerjilere çevrilerek depolandığı yöntemlere göre temelde ikiye ayrılır.

Doğrudan depolama elektrik alanda depolama yapan kondansatörler ve manyetik alanda depolama yapan süperiletken bobinler vasıtasıyla yapılır. Dolaylı depolamada ise elektrik enerjisi pillerde önce kimyasal enerjiye, volanlarda kinetik enerjiye, pompalanmış su tesislerinde potansiyel enerjiye, basınçlı hava ile depolama sistemlerinde mekanik enerjiye, ısı enerjisine dönüştürülür sonra da ters işlemle elektrik enerjisine geri kazanılır.



Şekil 3. Enerji Depolama Sistemleri (Sels vd., 2001)

7. BASINÇLI HAVA DEPOLAMALI ELEKTRİK SANTRALLARI

Elektriğin fazla ve ucuz olduğu saatlerde kompresör çalıştırılarak ortamdaki hava yeraltındaki geçirimsiz mağaralarda sıkıştırılarak depolanmakta ihtiyacın olduğu saatlerde ise basınçlı hava ile türbinler çalıştırılarak elektrik üretilmektedir. Bu yöntemde havanın sıkıştırılarak depolanabilmesi için geçirimsiz bir formasyona ihtiyaç vardır. Doğal boşluklar, terkedilmiş madenler tuz mağaraları kullanılabileceği gibi yapay boşluklarda yaranabilmektedir. Havanın sıkıştırılması için yapay tanklar üzerinde de çalışmalar yapılmaktadır.

Gaz türbini tarafından üretilen enerjinin büyük payı kendi kompresörleri tarafından tüketilir. Bu gerçek enerji talebindeki dalgalanmalarla birleşmiş ve bunun sonucu

olan kullanım fiyatlandırma süresi Basınçlı Hava Enerjisi Depolama teknolojisinin gelişimi için motivasyon oluşturmuştur.

BHED'de depolamanın önemli bir bileşen olmasına rağmen turbo genişletici tarafından genişletilmesinden önce yanma odasında sıkıştırılmış havaya yakıt eklendiği zaman bu teknoloji saf bir depolama sistemi değildir. Bu yüzden enerji depolama teknolojisi olmasına rağmen BHED adyabatik alternatif uygulanmadığı sürece depolama ve üretimi içeren hibrid bir sistemdir.

BHED sisteminin termodinamik performansının santralin termoekonomik canlılığı üzerinde doğrudan etkisi vardır. Çalışan maliyet bileşenini etkilemektedir. Bu çalışmanın hedefi performans analizinin bazı sonuçlarını sunmak ve farklı termodinamik parametrelerin ara soğutucular, yeniden ısıtıcılar ve reküpatör dahil genel BHED sistemlerinin verimliliğini nasıl etkilediğini göstermektir.

Basınçlı Hava Enerjisi Depolama hızlı devreye girme oranları ve uzun süreli enerji depolaması için uygun olan bir teknolojidir. Elektrik, sıkıştırılmış havayı depodan geri alarak, bu hava içerisinde az bir miktar yakıt (genellikle doğal gaz) yakarak ve yanma ürünlerini türbin vasıtasıyla genişleterek rejenere edilir.

Sıkıştırılmış havayı depolama sistemi, bir hava depolama ortamı içinde enerjinin yoğun kullanımın gerektirmediği yani düşük kullanımın olduğu zamanlarda bir kompresör vasıtasıyla enerjinin depolanmasını sağlar. Rezervuar çeşitleri genellikle şunları içerir: doğal yeraltı kaynakları, erimiş tuz solüsyonları ve kayalardan oluşan fiziksel oluşumlar. Şarj olma esnasında, sıkıştırılmış hava rezervuara gönderilirken santral jeneratörü kompresör ile tersine hareket ederek mekanik enerji ihtiyacı sağlar. Santral deşarj olduğu zamanlarda ise sıkıştırılan hava içten yanmalı türbinleri çalıştırmak için kullanılır ve bu süreçte doğal gaz yakılarak aynı yolla türbinler hareket ettirilerek elektrik üretilir (Schainker, 1990).

Enerji, basınçlı hava enerji depolama sistemiyle talebin fazla olduğu zamanlarda kullanılmak üzere depolanır. Bu sistem ile hava elektrik fiyatının düşük olduğu

zamanlarda depoya pompalanır ve elektrik fiyatının pahalı olduğu zamanlarda doğal gaz ile yakılarak elektrik enerjisine çevrilir. Havanın pompalanması ve elektrik enerjisinin üretimi sırasında elektrik fiyatı farklıdır. Elektrik fiyatındaki bu fark ile kar elde etmek amaçlanır. Basınçlı Hava Enerji Depolama sisteminde havanın pompalanması işlemi ve elektriğin üretimi farklı zamanlarda yapılabileceği gibi her iki işlemde aynı zamanda yapılabilir. Genellikle elektrik fiyatları gece saatlerinde ucuz olurken gün içerisinde pahalı olur. Doğal gaz ve elektrik fiyatlarıyla birlikte türbin ısı oranının modele dahil edilmesi geliri maksimize edebilmek için gerekmektedir.

Dünya'da ilk olarak 1978 yılında Almanya'da çözünmüş tuz mağaraları kullanılarak 290 MW kurulu güçte sıkıştırılmış hava depolu elektrik enerjisi santrali inşa edilmiştir. 1991'de Alabamada 110 MW kurulu güçte santral kurulmuştur. Türkiye'de de ekonomik olarak geliştirilebilecek birçok alan olduğu bilinmektedir.

Büyük ölçekli enerji santrallerinde enerji depolama için kullanılacak en uygun metotlar yeraltı termal enerji depolama, hidroelektrik enerji depolama ve basınçlı hava enerji depolama yöntemleridir. Her üç yöntemin de enerji kayıplarının çok az olması bunların yıllık enerji dalgalanmalarını kararlı kılmada bile kullanılabilmelerine imkan tanır.

Basınçlı hava ile enerji depolama endüstride oldukça geniş kullanım alanı bulmuştur. Öte yandan küçük ölçekli basınçlı hava enerji depolama sistemleri geliştirilmeye çalışılmaktadır. Bu konuda yapılan araştırmalar daha çok sistem tasarımları ve kontrol stratejileri üzerinde yoğunlaşmıştır. Yeraltı termal, hidroelektrik enerji depolama ve basınçlı hava enerji depolama sistemleri büyük çaplı sistemlere daha uygundur. Büyük projeler için kullanılmalı ve bu nedenle de büyük yatırımlar gerektirirler. Dolayısıyla uygulama için daha geniş alana ihtiyaç duyarlar. Öte yandan bu üç depolama sisteminin belli jeolojik özelliklere bağımlı olduğu ve sadece coğrafyanın imkan verdiği ölçüde inşa edilebilecekleri unutulmamalıdır (Gemici, 2006).

7.1. Basınçlı Hava Enerji Depolama Santralının Çalışma Prensibi

Basınçlı hava enerji depolama sistemleri, sıkıştırma ve genleştirme işlemlerinin bağımsız ve farklı zamanlarda oluşması dışında geleneksel gaz türbinleri ile hemen hemen aynı şekilde faaliyet göstermektedirler. Geleneksel gaz türbinlerinin genleşme evresinden kompresörü çalıştırmaya kadar genellikle çıkış güçlerinin üçünü kullandıkları halde, sıkıştırma enerjisinin ayrı olarak sağlanıyor olmasından dolayı genleşme sırasında elektrik üretimi için tam türbin çıkışı kullanılabilir.

Sıkıştırma modu çalışması sırasında depolama rezervuarı içerisine hava enjekte eden kompresörler zincirini çalıştırmak için durgun düşük maliyetli elektrik kullanılır. Hava, maksimum işletme değerinin seçilen belirli yeraltı oyuk tarafından belirlendiği belirli bir basınçta ve çevre oluşumu sıcaklığında depolanır. Depolama hacmi duvarları üzerindeki termal gerilimi minimize etmek ve sıkıştırma aşaması verimliliğini artırmak için kompresörler arasında ara soğutucular ve kavern içerisine enjekte edilmeden önce çıkış soğutucusu kullanılır.

Genleşme modu esnasında, pik yüklü yüksek maliyetli elektrik üretimi için hava depodan çekilir ve belirli miktarda yakıt (genellikle doğal gaz) yakılır. Yakma türbin çıkışında bıçakların buzlanma riskini önler ve türbin malzemeleri veya mühürleri kırılğan hale gelebilir. Buna ek olarak rezervuarın duvar sıcaklığında hava sıcaklığının ve yakıt yanmasının (fuel combustion) olmaması durumunda santral üretim süresini ve üretilen enerjiyi azaltan aynı türbin çıkışı ve böylece santralin performans endeksini elde etmek için daha yüksek hava akımını gerektirebilir.

Sıkıştırma (depolama) modu çalışması sırasında yalıtımsız depolama rezervuarı içerisine hava enjekte eden kompresörler zincirini çalıştırmak için elektrik kullanılır, böylece hava yüksek basınçta ve çevreleyen formasyon sıcaklığında depolanır. Enjekte edilen hava sıcaklığını azaltmak için sıkıştırma zinciri ara soğutuculardan ve çıkış soğutucusundan faydalanır, böylece sıkıştırma verimliliği artır, depolama hacmi gereksinimi azalır ve depolama hacmi üzerindeki termal gerilim azalır.

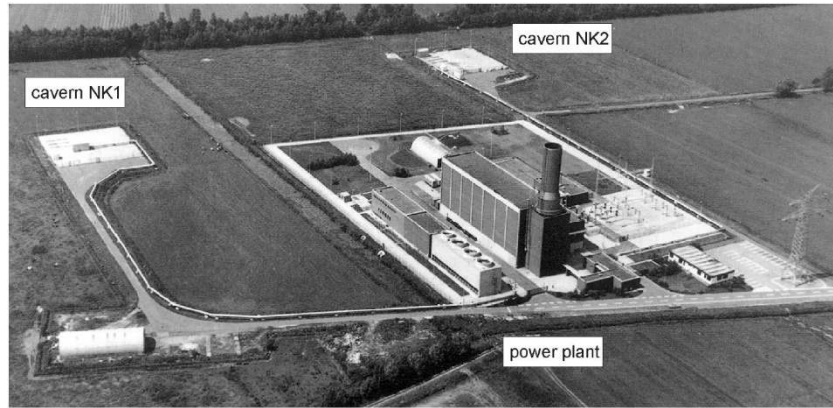
Sıkıştırma zinciri ara soğutucuları aralıcılığıyla gerçekleşen ısı kaybına rağmen çok sayıda kompresör evreli ve iç soğutuculu bir sistemde oluşum sıcaklıklarında depolama için teorik verimlilik elde edilebilir.

Rezervuar duvar sıcaklığında hava genişletilmesi aynı türbin çıktıları elde etmek için daha yüksek hava akışı gerektirebilir, böylece kompresör enerji giriş gereksinimleri şarj enerjisi oranının kabaca dört katı azalabileceği orana kadar artar. Buna ek olarak yakıy yanmasının olmaması durumunda türbin çıkışında düşük sıcaklık, yüksek basınçtaki hava için küçük spesifik nem içeriğine rağmen türbinden fazla miktarda hava akışından dolayı bıçaklar için önemli bir buzlanma riski ortaya çıkarabilir.

7.2. Mevcut ve Planlanmakta Olan Basıncı Hava Enerji Depolama Tesisleri

7.2.1. Huntorf Santrali

Dünyanın ilk basıncı hava enerji depolama tesisi olan Huntorf CAES santrali Almanya, Bremen yakınlarında 1978 senesinde tamamlanarak devreye alınmıştır. 290 MW'lık istasyon Kuzey Denizi yakınlarında nükleer santralleri desteklemek ve ucuz pik enerji sağlamak için ABB tarafından tasarlanmış ve inşa edilmiştir.



Resim 1. Huntorf Santralinin Genel Görünümü (Crotagino, F., 2006)

İstasyon 150.000 m³ hacminde iki ayrı kavernadan faydalanmakta olup, kavernalar yeraltı tuz domları içerisinde 48-66 bar basınç altında çalışabilecek şekilde tasarlanmışlardır. Basınçlandırma işlemi sırasında kompresörler 12 saatlik bir

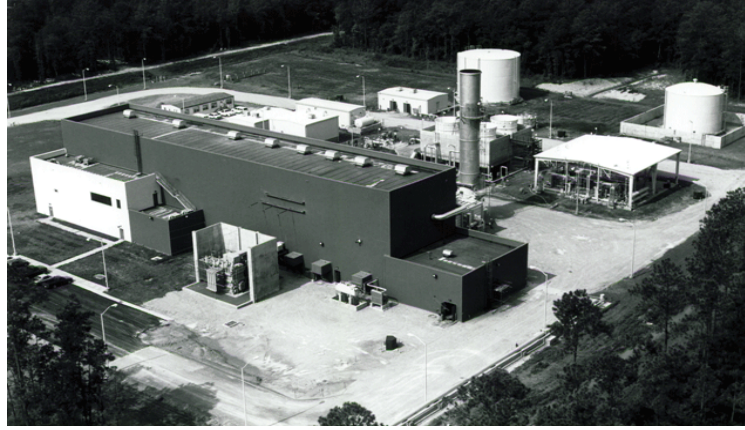
çevrimle 108 kg/s debiye sahip havayı 60 MW'lık bir elektrik girdisi ile kavernalar içersine pompalamaktadır. Üretim sırasında ise gaz türbinleri 3 saatlik bir çevrimle 425 kg/s debiye ulaşan basınçlı havadan 290 MW'lık bir elektrik üretimi gerçekleştirmektedirler.

Çizelge 1. Huntorf Santralinin Genel Özellikleri (Crotogino, F., 2006)

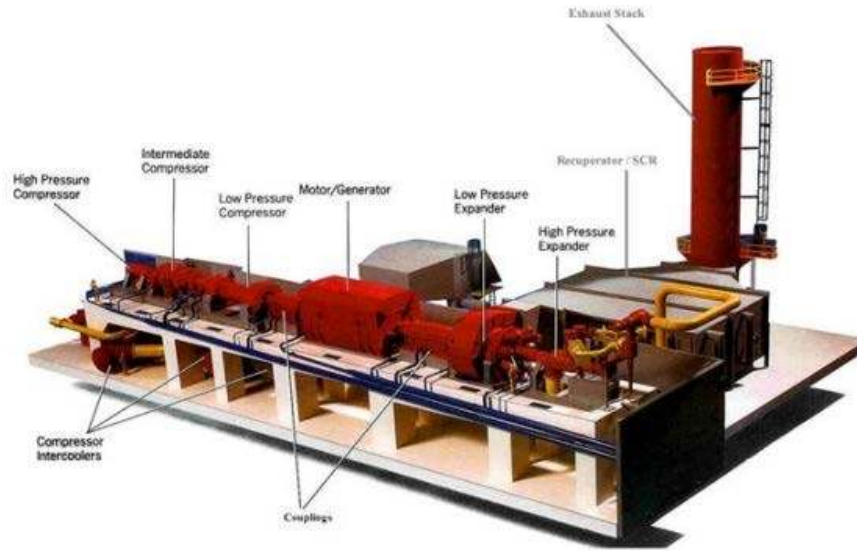
	Birim
Çıktı	
Basınçlandırma Operasyonları	60 MW
Üretim Operasyonları	290 MW
Hava Debi Oranı	
Basınçlandırma Operasyonları	108 kg/s
Üretim Operasyonları	425 kg/g
Hava Debi Oranları Giriş/Çıkış	1/4
Kaverna	2
Toplam Kaverna Hacmi	300.000 m ³
Kaverna Üst Kodu	650 m
Kaverna Alt Kodu	800 m
Maksimum Çap	60 m
Kaverna Aralıkları	220 m
Kaverna Basınçları (müsade edilen)	1 bar
Kaverna Basınçları (beklenen)	20 bar
Kaverna Basınçları (düzenli)	46 bar
Maksimum Basınç Azalma Oranı	15 bar/saat

7.2.2. McIntosh Santrali

110 MW'lık McIntosh istasyonu güneybatı Alabamadaki McIntosh tuz tepesine Alabama Electric Cooperative tarafından inşaa edilmiş ve 1991 senesinden beri kullanılmaktadır. Tam güçte 36 saat üretim yapmak için ve 45 ile 74 bar arası çalışma için tasarlanmış tuz kaverni (560,000 m³) kullanılmaktadır. Proje ve ekipmanlar Dresser-Rand firması tarafından geliştirilmiş olup, istasyonun birçok çalışma yöntemleri (giriş sıcaklıkları, basınçlar...v.b.) BBC tasarımı olan Huntorf istasyonu ile benzerdir.



Resim 2. McIntosh Santralinin Genel Görünümü (S.Succar,2007)



Şekil 4. McIntosh Santralinin Sistem Görünümü (V. Fthenakis,2008)

Çizelge 2. Huntorf ve McIntosh Santrallerinin Teknik Verileri (Crotagino, F., 2006)

Konum	Huntorf, Almanya	McIntosh, USA
Devreye Alınma	1978	1991
Kaverna Hacmi	300.000 m ³	540.000 m ³
Giren Enerji	12 saat 60 MW	41 saat 50 MW
Çıkan Enerji	3 saat 290 MW	26 saat 100 MW
1 kWh Elektrik için Gerekli Enerji Miktarı	0,8 kWh elektrik 1,6 kWh gaz	0,69 kWh elektrik 1,17 kWh gaz
Basınç Toleransı	43-70 bar	45-76 bar

7.2.3. Norton Santrali

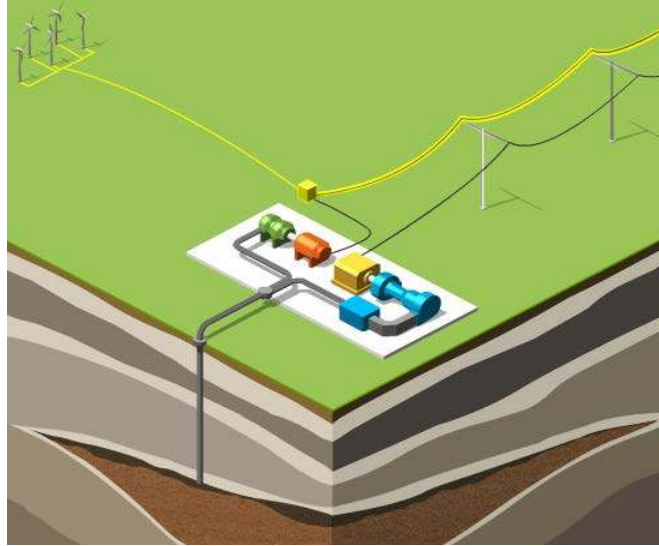
Ohio, Nortonda alışmayan 340.000 m³ hacme sahip kireçtaşı madeninde toplamda 2700 MW kapasiteli depolama istasyonunun ilk 600 MW'lık kapasitesini basıncılı bir hava enerji depolama tesisine dönüştürmek için gelişme evresinde olan bir projedir. 1999 senesinde satın alınan maden 9.6 milyon metreküp depolama sağlaması, 55 ve 110 bar arasındaki basıncıta çalışması planlanmaktadır.



Resim 3. Norton Santralinin Tasarım Görünümü (Haddington Ventures LLC,2010)

7.2.4. Iowa Depolanmış Enerji Parkı

The Iowa Stored Energy Park projesi, günümüze kadar ilan edilen doğrudan rögar enerjisi ile kombine çalışan ve gözenekli kaya depolama haznesi kullanan tek projedir. The Iowa Association of Municipal Utilities (IAMU) tarafından geliştirilen projede 268 MW elektrik enerjisi eldesi planlanmaktadır.



Resim 4. Iowa Santralinin Tasarım Görünümü (IAMU,2006)

7.3. Basınçlı Hava Enerji Depolama Uygulamaları için Depolama İmkanları

Basınçlı hava enerji depolama uygulamaları için farklı depolamalar imkanları mevcut olup bunlar yerüstü depolar ve tuz, sert kaya, gözenekli kaya oluşumları gibi yeraltı oluşumları ile temsil edilirler.

7.3.1. Tuz Oluşumları

Yeraltı tuz domları basınçlı hava enerji depolama uygulamaları için en uygun depolama şartlarını sunmaktadırlar. Tuz domları jeolojik zaman içerisinde sedimanter kubbe tipi yapılarından oluşan doğal tuz yataklarından meydana gelen oluşumlardır. Tuz domlarının yanı sıra tuz yeraltında ayrıca yataklanmalar göstermekte olup bu yataklanmalar geniş ve ince katmansı olmalarından dolayı bozulmaya daha yatkın olmalarından dolayı basınçlı hava depolama için uygun ortam sunamamaktadırlar.

Tuz kavernleri gerekli boyuttaki depolama hacmini geliştirmek için güvenilir, düşük maliyetli çözelti madenciliği tekniği ile inşa edilebilir (depolamadan elde edilen maliyet yaklaşık olarak 2 \$/kWh'dir). Bu teknik, oluşum içinde büyük bir boş alan bırakarak çözmek için su kullanımını ve belirli bir miktarda tuzun yataktan çıkarılmasını içermektedir.

Tuz kavernindeki hava daha kolay ve hızlı bir şekilde geri alınabilir ve kavernler diğer depolama tesislerinden daha hızlı bir şekilde hava ile doldurulabilir. Hem tuz kaverni hem de akiferlerde aynı kütle akışını koruma olasılığı akiferlerde çok sayıda kuyu kullanarak elde edilebilmesinden dolayı proje maliyetini yükseltir.

7.3.2. Sert Kaya Oluşumları

Tuz domlarına alternatif diğer bir depolama oluşumu olan sert kaya oluşumları genellikle rezervuarın yer yüzüne daha yakın (450 m ile 750 m) olan uygulamalarda kullanılabileceği düşünülse de maliyetlerinin yüksek oluşu (tipik olarak 30 \$ / kWh) ve henüz dünya üzerinde bir uygulamada kullanılmamış olmasından dolayı ilerki uygulamalarda ikinci bir depolama olasılığı olarak değerlendirilebilir.

7.3.3. Gözenekli Kaya Oluşumları

Tuz domlarının iyi birer çözüm olmaları ile birlikte, gözenekli kaya oluşumlarında basınçlı hava enerji depolama uygulamaları için kısa vadede iyi bir alternatif olarak ortaya çıkmaktadırlar. Buna bağlı olarak Iowa enerji depolama projesinde de gözenekli bir kaya ortamının değerlendirilmiş olması ilerki projelerin bu tür formasyonlara uygulanarak çözelti madenciliği tarafından ortaya çıkan yüksek kaverna geliştirme maliyetinin önüne geçilebilme imkanı doğmaktadır.

8. DEPOLAMA İÇİN KAYA TUZUNUN TERCİH EDİLMESİ

Tuz yatakları gerek kullanılabilir endüstriyel hammaddelerin ve stratejik önem taşıyan enerji hammaddelerinin, gerekse tehlikeli atıkların depolanması için en uygun yapıya sahiptir. Bu uygunluğun başlıca nedenleri aşağıda maddeler halinde sıralanmıştır (Kuntsman, Poborska, Urbanczyk, 2007):

- Tuz yataklarının yeryüzü genelinde yaygın ve sık oluşumu
- Tuz yataklarının geçirimsizliği, su geçişlerinin (akifer) bulunmaması
- Kaya tuzunun özel jeomekanik özellikleri, tuza özel plastik özellik (tuzun plastisitesi)

- Kaya tuzunun depolanan maddelerin büyük bir çoğunluğu ile reaksiyona girmemesi
- Tuz yataklarının ihtiyaç duyulan depolama hacimlerinin oluşturulabilmesi için yeterli kalınlığa sahip olabilmeleri
- Daha düşük maliyet

Kullanılabilir maddelerin depolama teknolojisi standartları aşağıda maddeler halinde sıralanmıştır (Kuntsman, Poborska, Urbanczyk, 2007):

- Kavernanın stabilitesi ve depolanan maddenin emniyeti
- Depolanan maddenin uzun dönem depolama periyodunda kalitesini koruması
- Boş kavernaya hızlı dolum yapılabilmesi
- Kullanıcı tarafından talep edilen debide kavernadan geriçekilim yapılabilmesi

Atık bertarafı prosesinde ise asıl amaç atık maddeyi atmosfer ve yer altı suyundan izole etmektir. Atık bertarafında aranan standartlar da aşağıda maddeler halinde sıralanmıştır (Kuntsman, Poborska, Urbanczyk, 2007):

- Kavernanın stabilitesi ve atık maddenin emniyeti
- Yüzyıllar boyu sürebilecek bir periyot için sızdırmaz izolasyonun sağlanması
- Boş kavernanın atık madde ile güvenli bir şekilde doldurulabilmesi



Şekil 5. Kaverna için Avrupa-Orta Asya Tuz Yataklarının Gösterimi (BAAR C.A.,1997)

9. ÇÖZELTİ MADENCİLİĞİ TEKNOLOJİLERİNİN ÖZETİ

Çözelti madenciliği prosesi hakkında daha detay bilgiler üzerinde durulmadan önce uygulanan teknolojinin temel özetini toplamak gereklidir. Kısa özeti şu şekildedir:

- Tuz yatağının jeolojisi, kaya mekaniği hesaplamaları ve yüzey koşullarına bağlı olarak uygun aralıklarla açılan kuyular ile tuz yatağına ulaşılır
- Eritme için kullanılan çözücü tuz yatağına kuyuda kullanılan üretim borularının içerisinden aktarılır
- Kuyunun çıplak kısmında tuz çözünür ve tuzlu su konsantrasyonu artar
- Eritmenin bir sonucu olarak, eritilen bu bölgede kaverna geliştirilir
- Madencilik faaliyeti sonrasında elde edilen ürün olarak tuzlu su, çözücünün kuyu içerisine girdiği basınç sayesinde yine üretim boruları aracılığı ile yeryüzüne taşınır.

Eritme için kullanılan çözücü madde sadece tuzun çözünmesini sağlayarak kavernayı meydana getirmekle kalmayıp, çözünen tuzu diğer bir deyişle zenginleştirilmiş cevheri yeryüzüne taşıyarak ve çözünmeyenlerin kavernada

ökөлmesini sağlayarak son derece önemli bir görev üstlenir.

Çözelti madenciliği sonucu elde edilen temel ürünler ise şunlardır:

- Tuzlu su (doygün veya yarı doygün)
- Eritme esnasında oluşturulan ve depolama veya atık bertarafı için kullanılabilir kaverna
- Tuzlu su ve kaverna

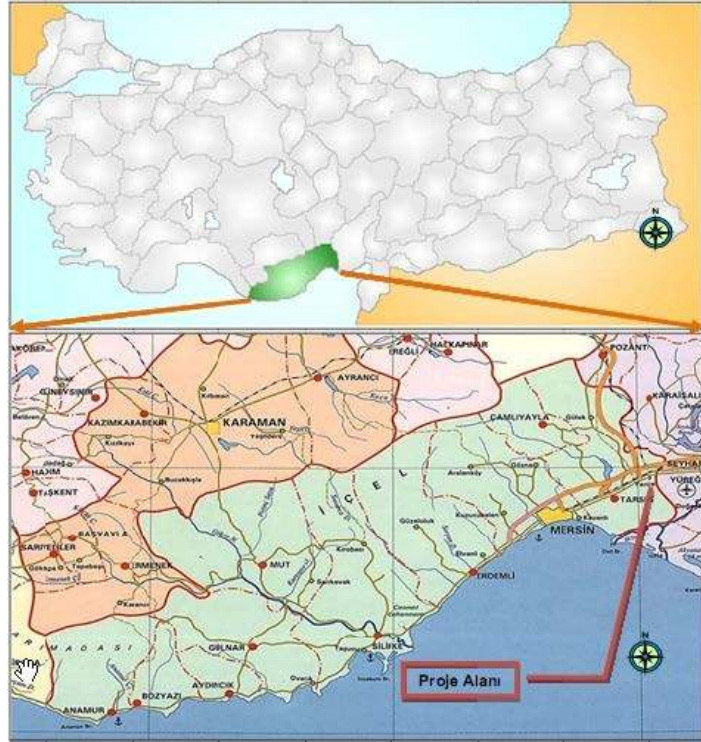
10. BHED SİSTEMLERİNİN EKONOMİK YÖNDEN ÖNEMİ

Mersin ili, Tarsus ilçesine kuşuçuşu 11,4 km uzaklıkta gerçekleştirilen 2 adet 270.000 m³ kapasiteli kavernaları içerisinde barındıran basınçlı hava depolama sistemlerinde depolanan basınçlı hava Türkiye’de mevsimsel değışikliklerin oluşturduğu arz talep dengesizliğinde arz güvenliğini sağlayacaktır.

Bunun yanında mevcut doğal gaz tüketiminin hergeçen yıl artmasına bağlı olarak gerek devlet gerekse özel sektör yatırımcıları tarafından doğal gaz depolama tesislerinin uygulanabilirliği ile ilgili proje geliştirme aşamasında mevcut basınçlı hava depolama tesisleride efektif bir şekilde kullanılabilir.

10.1. Sistemler İçin Seçilen Yerin Konumu

Sistemler için seçilen saha Akdeniz bölgesinde Mersin İli, Tarsus ilçesi sınırları içerisinde yer alan, Kocaköy ve Nemiroğlu köyleri arasında yer almaktadır. Sahasının proje işaretlendiği yer bulduru haritası Şekil 6’da sunulmaktadır. Önerilen proje için seçilen saha Tarsus ilçesine kuşuçuşu 11,4 km, Mersin il merkezine yaklaşık 36km, Adana il merkezine yaklaşık 28 km uzaklıktadır. Projenin Akdeniz’e olan uzaklığı yaklaşık 23,4 km olup tuzlu su deşarjı bu mesafe boyunca inşa edilen boru hattı sistemi ile Akdeniz’e verilerek yapılmıştır.



Şekil 6. Tarsus Yeraltı Depolama Projesi Yer Bulduru Haritası (Armada, 2011)

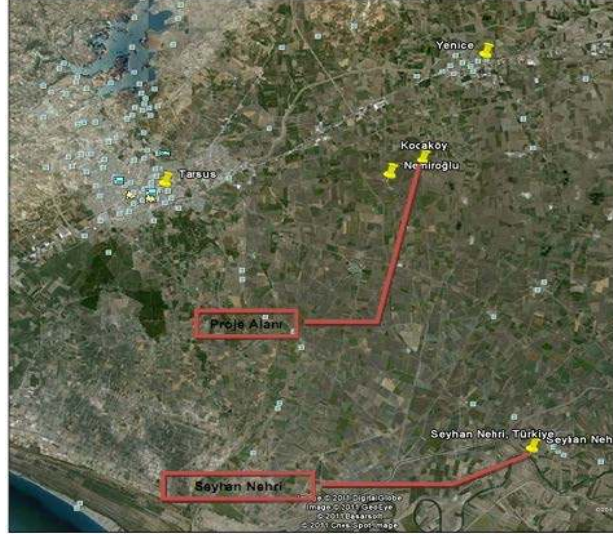
Basıncılı hava depolama için kullanılacak kavernalarının lokasyonu Şekil 7’de uydu görüntüsünde görülmektedir.



Şekil 7. Önerilen Proje Alanı ve Yakın Çevresinin Uydu Görüntüsü (Armada, 2011)

Proje koordinatları içerisindeki sahada Kamber Höyüğü mevkii, Esenler, Selağzı mevkii, Armutlu, Koğukdutlu mevkii ve Kocaköy yerleşim yeri kalmaktadır. Proje

için düşünölen kaverna sahası Adana-Mersin (D 400) karayolunun 4,5-5 km güneyinde kalmaktadır. Tarsus ilçesinde yer alan proje alanı 1722 hektardır.



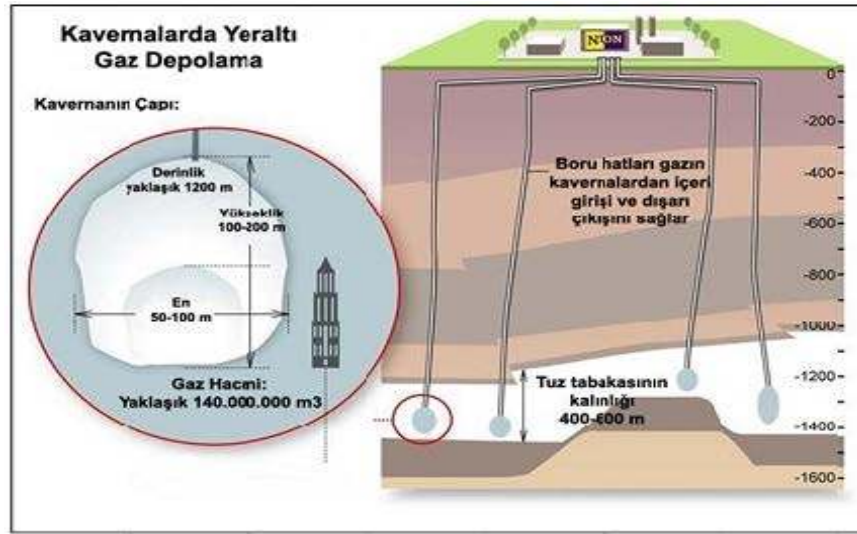
Şekil 8. Proje Sahası ve Tatlı Suyun Alınacağı Nehrin Uydu Görüntüsü (Armada, 2011)

10.2. BHED için Yer Seçimi

Yeraltı basınçlı hava depolama tesisinin kurulacağı mevkinin seçiminde dikkate alınan kriterler ve seçim sebepleri aşağıda listelenmektedir.

- Yapılan sismik etütler ışığında, basınçlı hava depolaması için uygun olan ve dünyada da kabul görmüş yeraltı tuz tabakalarının, proje sahası içerisinde uygun kalınlık, derinlik ve miktarda olması,
- Yeraltı tuz kavernlerinin eritilmesi işleminde (liç) gerekli olan tatlı su ihtiyacını karşılamak için gerekli su kaynaklarının yakınında ve yeterli olması,
- Liç işlemi sonucunda oluşacak olan tuzlu suyun deşarj edilebileceği uygun bir alana yakın olması,
- Tesis için gerekli makine ve ekipmanların nakliyesini kolaylaştıracak kara, deniz ve hava ulaşım hatlarına yakın olması,
- Ticari uygunluğu (fiziksel ve altyapı yatırımlarının büyüklüğü ve arazi maliyetlerinin ekonomik olması),

- Proje sahasının topografyası ve rakımının depolama tesisi kurulumuna elverişli olması,



Şekil 9. Yeraltı Tuz Yataklarında Oluşturulan Kavernaların Genel Görünümü (Tutuş, 2007)

10.3. Sistem Kapsamındaki Kavernaların Konumu

Mersin ili, Tarsus ilçesinin doğu ve güneydoğu bölgesinde, yeraltındaki tuz yataklarının, tatlı su vasıtasıyla eritilmesi ile elde edilecek olan kavernalarda tez kapsamında basınçlı hava depolama projesi gerçekleştirilmiştir.

Depolama projesi; yeraltı ve yerüstü tesisleri ile tatlı su temini, tuzlu su deşarjı ve basınçlı hava branşman hatlarından oluşmaktadır. Yeraltı tesisleri operasyonları 2 adet kavernaların açılması ve ilk gaz dolumunun yapılmasının ardından toplam 540.000 m³ lük işletme havasının kavernaya dolumu işlemlerinden oluşmaktadır. Yerüstü ise; tatlı su temini, deşarj hattı, kuyulara bağlanan basınçlı hava hatları ile sahaya ve taşıma hatlarına bağlanan hava hatları dahil gaz operasyonları tesislerini içermektedir.

Bölgedeki tuz tabakaları yer yüzeyinin yaklaşık 1100 m altından başlayıp, yaklaşık 1600 m tabakalarına kadar uzanmaktadır. Kavernalar sondaj kulesiyle açılacak

olup 2 kaverna grubunun eritilerek açılma işlemi yaklaşık 1 yıl kadar süreceği hesaplanmıştır.

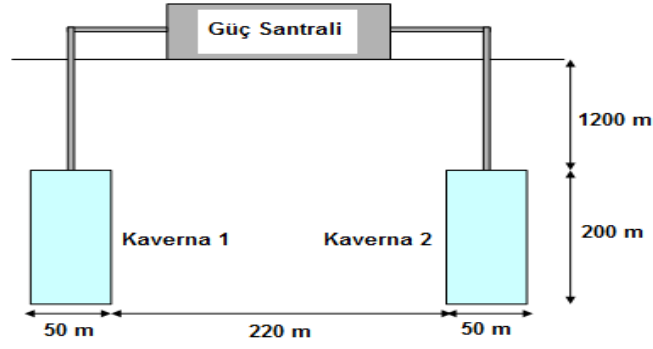
Yeraltı tuz yataklarında kaverna oluşturma ve bu kavernalarda basınçlı hava depolama yönteminin esası, yeraltına sondaj kuyusu içerisine yerleştirilen boru vasıtasıyla gönderilen tatlı suyun, tuz yataklarındaki katı tuz minerallerini çözündürmesi esasına dayanmaktadır.

Kavernalarda depolanabilecek toplam basınçlı hava miktarı kaverna hacminin dışında; tesisin derinliğine, işletme gazı ve yastık gazı miktarlarına, en küçük çalışma basıncı, en büyük çalışma basıncı ve en büyük çekim miktarları gibi bazı etkenlere bağlıdır. Yastık gazı, kaverna içerisinde tesisin işletilebilmesi için gerekli olan ve her zaman bırakılması gereken asgari gaz miktarı olarak tanımlanabilir. İşletme gazı ise kavernada depolanan toplam gaz miktarından yastık gazının düşürülmesiyle elde edilen ve çekim ile doldurma işlemi için kullanılabilir durumdaki gaz miktarı olarak tanımlanır.

Kavernaların üst kotu yaklaşık 1150-1200 m derinliklerde, kavernaların yüksekliği ise yaklaşık 150 m olarak tasarlanmıştır. Her bir kavernanın geometrik hacmi 270.000 m³ olacak ve her kavernanın çalışma gazı hacmi yaklaşık 27 milyon m³ olup toplam 54 milyon m³'lük işletme gazını sağlamak üzere tasarlanmıştır. Her bir kavernanın yastık gazı yaklaşık 6 milyon m³, toplam 2 adet kaverna için 12 milyon m³ olması planlanmıştır.

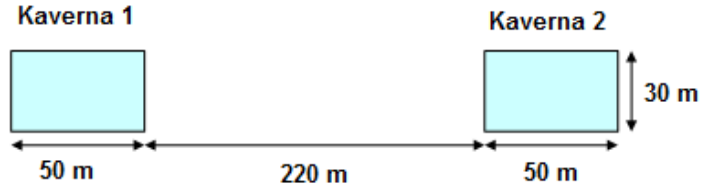
10.4. Eritme (Liç) İstasyonu

İki adet kavernanın yaklaşık 1200 ile 1350 metre arasında açılmıştır (Şekil 10). Her bir kaverna geometrik olarak 270.000 m³ hacme sahip olacak şekilde açılmış ve bu işlemin 1,5 yılda açıldığı varsayılarak bir eritme programı doğrultusunda çalışmalar sürdürülmüştür. Laboratuvarlarda yapılan tuz çözme testleri ve çözünmeyen madde miktarı bu çalışmada belirleyici olmuştur. Kavernanın jeomekanik sınır hatları maksimum ve minimum kaverna basınçlarının dengeli ve sabit olmasına bağlıdır.



Şekil 10. Kavernaların Yeraltı Gösterimi

Eritme işlemleri için tatlı suyun Seyhan Nehri'nden alınmaktadır. Tatlı su hattının uzunluğu yaklaşık 19,2 km'dir. Burada kurulan pompa istasyonu, tatlı suyu, eritme pompalarında gerekli minimum emiş basıncını göz önüne alınarak eritme istasyonuna basmaktadır. Eritme pompaları bir ağ şeklinde kavernaları besleyecek şekilde tasarlanmış ve ayrıca kavernadan eritme istasyonuna tuzlu suyu geri döndüreceklerdir.



Şekil 11. Kavernaların Yerleşimi

Kavernalardan gelen tuzlu su (brine), tuzlu su tankına gelmektedir. Bu tank, tuzlu su deşarj sistemine bir stok tankı gibi hizmet vermektedir. Tanktan gelen tuzlu su eriyiği pompa ile, Akdeniz'e 23,4 km'lik bir boru hattı ile ulaşmaktadır.

10.5. Eritme Yöntemleri

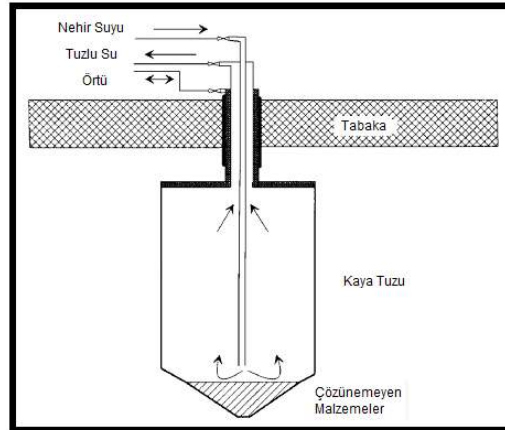
Temel olarak çözelti madenciliğinde iki türlü eritme yöntemi vardır.

- Doğrudan eritme yöntemi

- Ters veya dolaylı eritme yöntemi

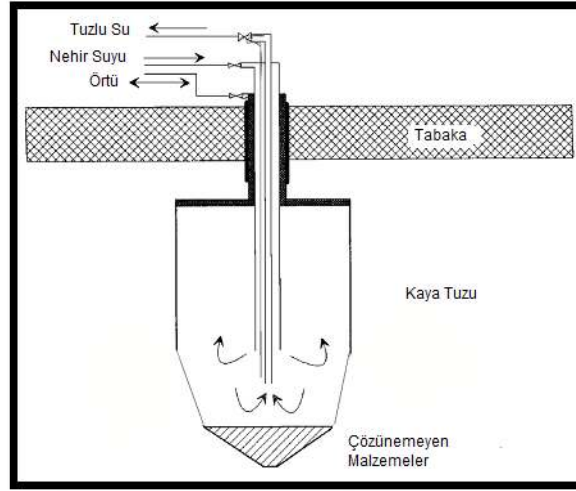
Doğrudan eritme yöntemi uygulandığında tatlı su eritme düzeneğine iç borudan verilir ve tuzlu su iç ve dış eritme düzeneği arasındaki dış borudan alınır. Ters eritme yönteminde, tatlı su verilir ve tuzlu su iç eritme düzeneğinden alınır.

Bu yöntemle yüksek eritme verimliliğine ulaşılır. Çünkü tatlı su girişten, çıkış noktasına kadar çok yol kaydeder. Bundan dolayı, ters eritme yöntemi operasyonlarda daha çok tercih edilir. Sadece ilk eritme gerçekleştirilirken doğrudan eritme, çözünmeyen seviyesindeki artışı geciktirerek kavernanın taban bölümünden maksimum şekil gelişimini sağlamak için tavsiye edilir.



Şekil 12. Doğrudan Sirkülasyonda Eritme İşlemi Diyagramı (BUJAKOWSKI, S.,1984)

Bütün eritme kavramı, net hedeflenen 270.000 m³ lük geomekanik sınır şeklinde bir kaverna oluşturmaya dayanmaktadır. Eritme işlemleri fazlar halinde yerine getirilmiştir. Her bir faz için düzenek pozisyonu, izolasyon maddesi seviyesi, eritme oranı (hızı), eritme zamanı ve kaverna hacmi belirlenerek en son eritme 270.000 m³ lük toplam hacme ulaşılmıştır.



Şekil 13. Ters Sirkülasyonda Eritme İşlemi Diyagramı (BUJAKOWSKI, S.,1984)

Hali hazırda en sık kullanılan metot, yüzeyde bulunan pompalarla eritme maddesini yani tatlı suyu kavernaya sürekli pompalamaktır. Pompalar, kuyu aracılığıyla, aynı anda tuzlu suyu kavernadan dışarıya doğru iterek, tatlı suyu mağaranın içine pompalarlar. Kaverna tamamen, tavana kadar tuzlu suyla doludur.

Eritme ile işletme sistemleri burada iki kıstasa göre sınıflandırılmışlardır:

1. Eritme bölgesinin daha üst bölgelerden izole edilmesi
2. Eritme işlemi borularının pozisyonu

Dikey eritme oranı, yatay eritme oranından oldukça yüksektir. Bu nedenle, kavernayı istenen bir tasarımda elde etmek ve kaverna tavanını istenen seviyede dengelemek için, sıvı veya gaz izolasyon maddesi kullanılarak genellikle bir tavan izolasyonu uygulanır. Bu eritme yöntemi, tavan izolasyonu ile kontrollü eritme olarak adlandırılır. Bu tür bir izolasyon elde etmek için, bir gaz veya sudan daha hafif bir sıvı kaverna tavanı altına pompalanır. Çözelti madenciliği uygulamasında, aşağıdaki maddeler izolasyon maddesi olarak kullanılırlar:

- Yağ (örneğin jojoba yağı)
- Mazot, ham petrol, petrol veya sıvı propan-bütan
- Sıkıştırılmış azot (yerüstüne sıvı halde taşınmış olarak)

İzolasyon maddesi kavernaya, en son çimentolanan casing ile dış tubing arasındaki halkasal kısımdan pompalanır.

Avrupa'da en çok kullanılan izolasyon maddesi yağ yada azot gazıdır. Yağın diğer izolasyon maddelerine göre avantajları; daha ekonomik, düşük sıkıştırılabilirlik ve yeryüzü tuzlu su tankına giden tuzlu su ile birlikte mağradan dışarı pompalanan yağın neredeyse tamamını geri kazanmak; olarak sıralanabilir.

10.6. Kavernalar

Kuyu açma, kaverna oluşturmada ilk adımdır. Sistemlerin uygulanacağı kuyular dikey olarak açılmıştır. Çözelti madenciliği yoluyla yeraltı doğal gaz depolama kavernaları oluşturmak için en uygun tuz alanlarının açılması sağlanmıştır. Sondajın toplam derinliği yaklaşık 1500 metredir. Genel olarak kaverna kuyusunun tasarımı, kaverna eritme periyoduna, jeolojik koşullara, sondaj derinliği ve çapına ve üretim borulamasına (borularına) bağlıdır.

Yapılan sismik etüt sonucunda kavernaların üst kotu yaklaşık 1170-1270 metre derinliklerde, kavernaların yüksekliği yaklaşık 250-350 metre, çapı 50 metre olacak şekilde tasarlanmıştır. Güvenliğin sağlanması açısından; aynı 2'li kaverna grubundaki kavernaların merkezden merkeze uzaklığı yaklaşık 220 metredir.

Bu tesisler; kavernaların 2'şerli olarak açılacak şekilde ve her bir kaverna için maksimum eritme hızı 300 m³/saat olacak şekilde tasarlanmıştır. Projede kapsamında açılan 2 adet kavernanın her birinin geometrik hacmi 270.000 m³ olacak ve her kavernanın çalışma gazı hacmi yaklaşık 27 milyon m³ olup toplam 54 milyon m³ lük (2 kaverna * her kaverna için 27 milyon m³) işletme gazını sağlamak üzere tasarlanmıştır.

Son yeraltı kaverna kapasitesi çeşitli faktörlere dayalı olup bu faktörler çoğunlukla kayatuzu yatağının özellikleri ve tuz tabakasının derinliği ile ilgilidir. Yeraltı kaverna verileri aşağıdaki şekilde tasarlanmıştır;

Hedef hacim her bir yeraltı kaverna için yaklaşık : 270.000 m³

Kaverna asgari işletme basıncı : Kaverna azami işletme basıncı 15 günlük asgari geri çekim süresi (işletme gazının teorik olarak elverişliliği) hedeflenmiştir.

Enjeksiyon için : 700.000 Sm³/saat ve yeniden üretim için : 1.500.000 Sm³/saat, Bu da enjeksiyon için 7.200.000 Sm³/gün ve geri çekim için 9.000.000 Sm³/gün oranlarına karşılık gelmektedir.

10.7. Kaverna Risk Senaryoları

Tükenmiş petrol/gaz sahaları ve kaverna depolama tesislerinde bulunan kuyularla ilgili potansiyel problemlere ek olarak, kaverna bütünlüğünü ve gaz sıkılığını sağlamak için bazı ilave potansiyel sorun daha bulunmaktadır.

Depolanmış ürünün serbest bırakılması olasılığının yanı sıra, kavernaların dayanıksızlık, yarıma ve çökmelerine eşlik eden temel faktörler şunlardır:

- Tuz çökmesi
- Kontrolsüz liç (kaverna inşaatı sırasında,kaverna işletimi sırasında)
- İçinde homojen tuz olduğu varsayılan anormal alanların (daha yüksek çözünürlük ya da gözenek) bulunmasıdır. Buna sızıntılı iç yataklar ya da homojen olmayan alanlar da dahildir
- Çok sık ve ıslak kayaç şartlarından etkilenmiş tuz yapısı (sirkülasyon halindeki toprak suyu)
- Kaverna kenarlarından sızma
- Depolanan ürünün kaverna duvarlarındaki çatlaklardan sızması

- "Koruyucu" kaverna çatısı tuzunun incelmesine neden olan kısmi kaverna çatısı çökmeleri
- Tuz olmayan iç yataklarda oluşan iç tabaka ya da katmanların çökmesi
- Tuz yataklarında gaz bulunması potansiyeli (doğal olarak)
- Çukurda bulunan konsantre tuzu emen ve çelik kuyu kaplamasını yüksek derecede bozan ve tahrip eden gaz (ya da hava)

Kontrolsüz liç işlemleri; kaverna yapısında bazı sorunlara ve gaz depolaması için stabil olmayan, kötü şekillenmiş ve yetersiz boşluklar oluşmasına neden olabilir. Örneğin, eğer daha fazla çözülebilir evaporitik katmanlar (örn. Potasyum karbonat-potas) tuz içerisinde mevcutsa, beklenmedik bir şekilde kalın kaya tuzu olmayan iç yataklar mevcutsa ya da ıslak kayaç başı gelişmişse sorunlar ortaya çıkabilir.

Kalın potas yada ıslak kayaç başının varoluşu muhtemelen kontrolsüz çözme ya da tuzun beklenen yatay çözülmesini daha da arttırmaktadır. Tuz çıkarma işlemleri, kuyular arasında çözelti kanalları labirentlerinin oluşumuna bağlı olarak belirlenen ve tuz çıkarma işlemlerinden belirli bir mesafede bulunan enjeksiyon ve üretim kuyularına sahiptir. Gaz depolaması için kaverna açılması sırasında, çözelti kanallarına bitişik kavernalar arasında ya da aynı tuz çıkartılan iki kaverna ile olan haberleşme ve bağlantı ya da aşırı genişleme gibi sorunlar ile karşılaşılabilir.

Kontrolsüz eritme işlemleri, aynı zamanda, beklendiğinden daha ince olan veya olmayan tuz çatısında, istenmeyen bir çözelmeye de neden olabilir. Potansiyel olarak, kaverna tesisi gelişimi sırasında kaverna çatısının ve yayılan katmanların çökmesi de dahil olmak üzere, yüzeyde bir krater oluşumuna neden olabilecek tehlikeli durumlara da yol açabilir.

Gazın kaverna yalıtımından serbest kalması senaryosu, kaverna içinde gazı tutan yalıtımın bozulması ile ilgilidir. Bu durumda depolanan gaz, kuyu sondajında serbest kalabilir ve buradan ya doğrudan ya da daha sık katmanlardan yüzeye sızabilir. Ancak, yalıtımlı "statik" duruma rağmen, bazı senaryolarda, enjeksiyon ve

çekme çevrimleri sırasında depolama kavernasında devam eden işletme sırasında daha büyük riskler öngörülebilir.

Kuyu muhafazaları genel olarak çeliktir ve zamanla bunlar ciddi bir şekilde kuyu kaplamalarının bozulmasına neden olan tuz nedeniyle bozulur (aşınırlar). İlk başta bu, kavernanın üst kısmına yakın bir yerde olabilir ve uzun vadede kuyu kaplaması, daha sığ derinliklere kadar inmeyi başaramaz. Eğer uzun bir süre boyunca tamamen basınçlı durumda bırakılırsa, kavernadaki basınç; etraftaki tuz ve tuz çöküntülerden kaynaklanan sıcaklığın da eklendiği birleşik etkiler nedeniyle, potansiyel olarak artabilmektedir. Kaverna basıncı, eğer yeteri derecede yüksek bir seviyeye ulaşırsa, bu durumda kaverna yalıtımı; dolgu çatlakları ve yalıtım etrafındaki tuzun çözülmesi ya da diğer nedenlerden ötürü etkili olamayacaktır. Bu durumda gaz, kuyu sondajlarından toprak yüzeyine doğru hareket eder ve kaverna içindeki basınç da hidrostatik değere düşebilir. Kavernadan çıkan gaz, yalıtımın başarısız olması durumunda aynı zamanda bitişik formasyonlar içerisinde de lateral bir şekilde hareket edebilir. Genel olarak, sıradan çelikten imal edilen kuyu kaplaması zamanla tuz içeren yer altı suyuna maruz kaldığından yüksek olasılıkla hasar görecektir.

Eğer kavernadaki minimum basınç değerleri ciddi bir şekilde izlenmezse, bu durum kuyu etrafındaki kaverna çatısında bulunan tuzda zayıflamaya neden olabilir. Tuzda kırık ve çatlaklar meydana gelebilir ve aynı zamanda tuz ve kuyu arasında oluşan yalıtımda bozulma meydana gelebilir ve buradan gaz kaçar, kuyu damarlarına girer ve daha sonra da yüzeye ulaşır.

Kaverna içerisindeki minimum basınç korunmadığında, tuzun çözülmesi sonucunda (mikrokırıklar ve parçalar) meydana gelebilecek kaverna duvarlarındaki çatlaklar, etraftaki kaverna duvar ve çatısından gazın serbest kalmasına neden olur. Böyle hasar görmüş bir alan, daha sonra tuzsuz ince yataklarla kesişir ve gazın kavernadan uzağa taşınmasına müsaade eder. Bu hasar, aynı zamanda kavernanın basınçlandırılması ya da termal ısınma ve tuz çökmesi etkilerinin birleşimi sonucunda da meydana gelebilir. Serbest bırakılan gaz miktarı, kaverna

içindeki basıncın, çatlakların hacminin ve çatlak basıncının bir fonksiyonu olabilir. Çatlaklardaki basınca bağlı olarak, serbest bırakmadan sonra, ilave tuz çökmesi sonucunda kendi kendini onarabilir ancak mağaranın yeniden basınçlandırılması bu çatlakların açılmasına da neden olabilir.

Sızıntılı iç yataklar ya da homojen olmayan alanlardan gazın serbest kalması senaryosunda, kavernanın dış çevre ile bağlantısına olanak sağlayacak sızıntılı bir iç yatak oluşabilir. Kaverna basıncı enjeksiyon ve/veya termal etkiler/tuz çökmesi sonucunda artabilir, gaz mevcut basınç ya da kimyasal değişim altında lateral olarak taşınabileceği iç yataklara doğru sızabilir.

Kaverna yalıtımının da bozulması ve kısmi çatı çökmesi sonucunda kaverna bütünlüğünün bozulması gazın serbest kalmasına neden olabilir. Eğer çökmeye dikkat edilmezse, bu durumda serbest kalma, kaverna içerisinde basınç enjeksiyon ya da (daha düşük olasılıkla) tuz çökmesi sonucunda artacaktır. Sızıntılı iç yataklar ya da daha yüksek geçirgenlikli malzemeler olan, homojen olmayan alanlardan sızıntı ile kısmi bir çatı çökmesi şeklinde, kendini uzun ve yavaş bir salınım olarak gösterebilir.

Eğer minimum basınç ciddi bir şekilde izlenmezse, çevrimsel olarak kaverna içindeki gazın basınçlandırılması ve basıncın düşürülmesi sonucu, mağara çatı ve duvarlarının kırılmasına ve çökmesine neden olur. Çatının çökmesi sadece kuyu sondajı katmanının girişinde, değil aynı zamanda kaverna içindeki kuyu katmanında da bir tehdit oluşturabilir.

Tuzsuz iç yataklarla oluşan dahili ya da yüksekliklerin çökmesi durumu, yapısal olarak kalın tuz oluşumuna neden olur. Ancak kavernalar da aynı şekilde, değişen kalınlıklardaki iç yataklı tuzsuz katmanları da içeren kalın yataklı tuz (kaya tuzu) katmanlarında inşa edilir.

Bu tür çöküntü ya da yükseltilerin, kontrollü bir çökme ile kontrol edilmesi mümkündür. Ancak ortaya çıkan birikinti, kavernanın tabanındaki bir çukur içine düşer ve kendi etkin hacmini ve depolama hacmindeki etkileri azaltır.

11. SİSTEM PARAMETRELERİ ve DETAYLARI

Basıncılı hava depolama sisteminde bulunan ekipmanların performan analiz denklemleri incelenecek olursa;

- Motor;

$$\text{Debi} = \frac{\text{Giren elektrik enerjisi} * \text{Motorun mekanik verimi}}{\text{Kompresörün spesifik işi}} \quad (1)$$

- Kompresörler;

$$\Delta T = \text{COT} - \text{CIT} = \frac{\dot{Q}_{k.giriş}}{\eta_{k.izentropik}} * \left[\left(\frac{P_{out}}{\dot{Q}_{in}} \right)^{(\gamma-1)/\gamma} - 1 \right] \quad (2)$$

$$\text{Spefifik İş} = Cp * \Delta T$$

$$\text{Güç} = \dot{m} * Cp * \Delta T$$

- Depolama;

$$\frac{\partial P_{volume}}{\partial t} = \frac{\gamma * R * T_{volume}}{\text{Volume}} * (\dot{W}_{in} - \dot{W}_{out}) \quad (3)$$

γ (gamma): Belirli bir sıcaklık ve hacim içerisindeki akışkan

R : Gaz sabiti (hava için $287,058 \frac{J}{kgK}$)

T_{volume} : Hacim içerisindeki sıcaklık (K)

$\dot{W}_{in}$: Hacim içerisine basılan hava debisi (kg/s)

$\dot{w}_{out}$: Hacim içerisinde çekilen hava debisi (kg/s)

Sıkıştırma ve üretim aşamalarının farklı zaman dilimlerinde gerçekleşeceğinden dolayı, yukarıdaki eşitlik iki ayrı denklem olarak değerlendirilebilir,

$$\frac{\partial P_{cavern}}{\partial t} = \frac{\gamma * R * \dot{w}_{in} * T_{cavern}}{V_{cavern}} \quad (4)$$

T_{cavern} : Kaverna sıcaklığı (K)

V_{cavern} : Kaverna hacmi (m³)

- **Isı Eşanjörü;**

$$\text{Verim } (\eta) = \frac{\text{Eşanjör çıkış sıcaklığı} - \text{Soğuk kaverna hava sıcaklığı}}{\text{LP türbin çıkış sıcaklığı} - \text{Soğuk kaverna hava sıcaklığı}} \quad (5)$$

- **Türbin;**

$$\Delta T = TIT - TOT = \eta_{T.izentropik} * TIT * \left[1 - \left(\frac{1}{\text{Basınç oranı}} \right)^{(\gamma-1)/\gamma} \right] \quad (6)$$

$$\text{Türbin Gücü} = \dot{m} * C_p * (TIT - TOT) \quad (7)$$

TIT : Türbin giriş sıcaklığı (K)

TOT : Türbin çıkış sıcaklığı (K)

11.1. Performans İndeksleri :

- **Isı Oranı;**

$$\text{Isı Oranı} = 3600 * \frac{\dot{m}_{yakıt} * \text{LHV doğal gaz}}{\eta_m * \eta_G * \dot{W}_{trb}} \quad (8)$$

η_m : Türbin mekanik verimi

η_G : Jeneratör verimi

Basıncılı hava depolama yönteminde ortaya çıkan atık ısı, sistem bileşenlerine bağlı olarak genellikle LP türbinlerin egsoz gazlarının yakalanması sonucu ortaya çıkmaktadır.

Isı eşanjörü kullanılan sistemlerde ısı oranı 4200-4500 kJ/kWh LHV aralığında iken, ısı eşanjörü kullanılmayan sistemlerde bu oran 5500-6000 kJ/kWh LHV olarak ortaya çıkmaktadır.

- **Spesifik Yakıt Tüketimi;**

SFC, 1 kWh çıktı için gerekli olan yakıt tüketiminin kg olarak miktarını belirtir.

$$SFC = 3600 * \frac{\dot{m}_{yakıt}}{\eta_m * \eta_G * \dot{W}_{trb}} \quad (9)$$

- **Elektrik Üretim Oranı;**

$$EPR = \frac{\text{Üretilen enerji}}{\text{Giren enerji}} = \frac{\eta_m * \eta_G * \dot{W}_{trb} * \Delta T_{deşarj}}{\dot{W}_e * \Delta T_{deşarj}} \quad (10)$$

EPR : Enerji Üretim Oranı

EPR mümkün olabildiği kadarıyla yüksek olması istenir. Bu değerin yüksek olması demek aynı zamanda üretilen elektriğin ve sisteme satılan elektriğinde yüksek olması anlamına gelir.

Direk elektrik enerjisinin şarj kaynağı olarak kullanıldığı ve yakıt enerjisinin kullanılmadığı sistemlerde ise aşağıdaki denklem 1 kW_h elektrik çıktısı için gerekli olan elektrik girdisini ortaya koymaktadır.

$$\text{Elektrik Oranı} = ER = \frac{\text{Giren enerji}}{\text{Üretilen enerji}} = \frac{\dot{W}_e * \Delta T_{\text{deşarj}}}{\eta_m * \eta_G * \dot{W}_{\text{trb}} * \Delta T_{\text{deşarj}}} \quad (11)$$

- **Toplam Sistem Verimi:**

$$\text{Verim} = \eta = 100 * \frac{\text{Üretilen enerji}}{\text{Giren elektrik enerjisi} + \text{Yakıtın termal enerjisi}} \quad (12)$$

$$= 100 * \frac{\text{Üretilen enerji}}{\text{Giren elektrik enerjisi} + \text{LHV} * \dot{m}_{\text{yakıt}} * \Delta T_{\text{deşarj}}}$$

- **Birincil Enerji Verimi:**

Temel yükün maksimum güce çevrildiği basınçlı hava güç sistemlerinde karşımıza çıkan diğer bir terimde BEV (Birincil enerji verimi)'dir. Toplam verimlilik değeri; birincil enerjinin elektrik enerjisine çevrildiği sistem verimliliğinin bir yansıması olarak ortaya çıkmaktadır.

$$\text{BEV} = 100 * \frac{\text{Üretilen enerji}}{\frac{\text{Giren elektrik enerjisi}}{\text{Santralin baz yükteki verimliliği}} + \text{Yakıt termal enerjisi}} \quad (13)$$

- **Depolanan Havadan Herbir Devirde Üretilen Enerji:**

$$E_{\text{GEN}} = \eta_m * \eta_G * \int_0^{\Delta T_{\text{deşarj}}} P_t * dt \quad (14)$$

Deşarj süresi, maksimum basınçta tam dolu olan kavernanın vanaların açılması ile yastık gazı basıncı miktarına düşünceye kadar geçen süreyi kapsar.

11.2. Ekonomik Analiz Parametreleri

Bir enerji santrali inşaatı öncesi bu santralin fizibil olup olmadığı ve geri ödeme süresinin mukayesini yapabilmek adına çeşitli ekonomik analizler yapılmaktadır.

Enerji santralinin performans analizleri tek başlarına yatırıma dönüşme aşamasında yeterli olmayabilir. Performans analizleri ile birlikte yatırım maliyetleri, operasyon ve bakım maliyetleri, vergisel yükler gibi giderlerin ayrı ayrı değerlendirilmeleri kaçınılmaz bir sonuçtur. Bu noktada ekonomik analiz için çeşitli kalemler ortaya çıkmaktadır bunlar;

- **Net Güncel Değer;**

Net güncel değer kavramı; yatırımdan doğan toplam indirgenmiş nakit akışı ile ilk yatırım tutarı arasındaki farkı ortaya koymaktadır. İndirim oranı kavramı ise yıllık net nakit akımı içerisinde risk ve faiz oranları olarak uygulanır.

$$NPV = \text{İlk nakit akışı} + \frac{ANCF_{1.yıl}}{(1 + DR)} + \frac{ANCF_{2.yıl}}{(1 + DR)^2} + \frac{ANCF_{yıl N}}{(1 + DR)^N}$$

$$NPV = \text{İlk nakit akışı} + \sum_{t=1}^T \frac{ANCF_t}{(1+DR)^t} \quad (15)$$

$$ANCF = \text{Yıllık operasyon kârı} - \text{Yıllık kredi geri ödemesi} - \text{Yıllık vergiler}$$

- **Yıllık Operasyon Kârı**

Basınçlı hava enerji santrallerinde ortaya çıkan yıllık operasyon kârı, düşük yükte elektrik tüketimi ile yada yakıt tüketimi ile üretilen elektriğin pik yükte sisteme satılması ve ortaya çıkan değerden de yakıt giderlerinin, operasyon ve bakım giderlerinin çıkarılması ile belirlenir.

$$\text{Satılan elektrik geliri} - \text{Giren elektrik maliyeti} - \text{Yakıt maliyeti} - \text{O\&M maliyeti} \quad (16)$$

$$\text{Satılan Elektrik Geliri} = \text{Pik yükte satılan MWh elektrik miktarı} * \$/\text{MWh} \quad (17)$$

$$\text{Giren Elektrik Maliyeti} = \text{Düşük yükte tüketilen MWh elektrik miktarı} * \$/\text{MWh} \quad (18)$$

$$\text{Yakıt Maliyeti} = \text{Yakıt tüketimi} * \text{Üretilen MWh} * \frac{\$}{\text{kg yada m}^3} \text{ yakıt} \quad (19)$$

$$\text{Operasyon ve Bakım Maliyetleri} = \text{Sabit O\&M maliyetleri} + \text{Değişken O\&M} \quad (20)$$

$$\begin{aligned} \text{Değişken O\&M Maliyetleri} = \\ \text{MWh başına değişken O\&M maliyeti} * \text{Üretilen MWh} \end{aligned} \quad (21)$$

$$\text{Sabit O\&M Maliyetleri} = \text{MWe başına sabit O\&M maliyeti} * \text{Üretilen MWe} \quad (22)$$

- **Yıllık Kredi Ödemeleri;**

$$\text{Yıllık Kredi Geri Ödemesi} = \text{Kredi geri ödemesi} + \text{Kalan kredi miktarının faiz ödemesi}$$

$$\text{Ödenecek Toplam} = V_o * \frac{i}{1 - (1-i)^{-N}} \quad (23)$$

N : Kredi süresi

i : Faiz oranı

V_o : İlk yatırım maliyeti

- **Makine-Ekipman Maliyet Modelleri;**

Yeraltı basınçlı hava depolama enerji santrallerinde kullanılan makine ve ekipman maliyetleri bakımdan ortaya çıkan en önemli kalemler ve bunların formülasyonları şu şekildedir;

$$\text{Kompresör Maliyeti (\$)} = \frac{100}{1 - \eta_{izentropik}} * \dot{m}_{hava} * r_c * \ln(r_c) \quad (24)$$

Isı Eşanjörü Maliyeti (\$) =

$$2880 * (\text{yüzey alanı, m}^2)^{0,69} * (\text{maksimum basınç, bar})^{0,28} \quad (25)$$

$$\text{Yanma Odası Maliyeti (\$)} = \frac{573}{1-f_{cc}} * \dot{m}_{hava} * [1 + \exp(0,02 * \text{TIT} - 31,86)] \quad (26)$$

$$\text{Türbin Maliyeti (\$)} = \frac{1148}{1-\eta_{izentropik}} * \dot{m}_{hava} * \ln(r_{exp}) * [1 + \exp(0,036 * \text{TIT} - 65,66)]$$

$$\text{Elektrik Üretim Maliyeti (\$)} = 103 * \text{güç}^{0,94} \quad (27)$$

$\eta_{izentropik}$: Kompresör ve türbinlerin izentropik verimleri

r_c : Kompresör basınç oranı

r_{exp} : Türbin genleşme oranı

$\dot{m}_{hava}$: Hava debisi $\left(\frac{\text{kg}}{\text{s}}\right)$

f_{cc} : Yanma odası basınç düşümü

12. TERMODİNAMİK PARAMETRELER VE SİSTEMLERİN ANALİZLERİ

Enerji analizi, termodinamiğin birinci kanunu olan, enerjinin korunumu prensibine dayanır. Enerjinin korunumu denklemleri, sistem ile çevre arasında gerçekleşen iş ve ısı etkileşimlerinin net etkisinden türetilir. Birinci yasa, birden çok giriş ve çıkışı olan sürekli akışlı bir kontrol hacmi için şu şekilde yazılır;

$$Q - W_{kh} = \sum m_{\dot{\varsigma}} \left(h_{\dot{\varsigma}} + \frac{V_{\dot{\varsigma}}^2}{2} + gz_{\dot{\varsigma}} \right) - \sum m_g \left(h_g + \frac{V_g^2}{2} + gz_g \right) \quad (28)$$

Yukarıdaki denklemde ısı transferi terimi yok edilir, potansiyel ve kinetik enerji farkları ihmal edilirse adyabatik bir süreçte üretilen güç aşağıdaki denklemle bulunabilir.

$$W_{kh} = \sum m_g h_g - \sum m_{\dot{\varsigma}} h_{\dot{\varsigma}} \quad (29)$$

Çevresel parametreler referans durum olarak kabul edildiğinde, belirlenen durumdan çevresiyle dengede olduğu duruma gelinceye kadar, bir sistemden tersinir bir süreçte elde edilebilecek maksimum güç, sistemin faydalı güç potansiyelidir ve fiziksel ekserji olarak adlandırılır. Ekserji analizi, termodinamiğin ikinci yasasına dayanmaktadır. Birden çok giriş ve çıkışı olan sürekli akışlı bir süreç, P_0 sabit basınç ve T_0 sabit sıcaklığında bir ısı kaynağı gibi davranan çevreyle ısı alışverişinde bulunabilir. Bu tür süreç için ikinci yasa yazılacak olursa;

$$S_{\text{üretim}} = \sum m_{\text{ç}} s_{\text{ç}} - \sum m_{\text{g}} s_{\text{g}} + \frac{Q_{\text{çevre}}}{T_0} \quad (30)$$

Burada $S_{\text{üretim}}$ birim zamandaki entropi üretimidir.

$\sum m_{\text{g}} s_{\text{g}}$ ve $\sum m_{\text{ç}} s_{\text{ç}}$ sırayla birim zamanda kontrol hacmine giren ve kontrol hacminden çıkan madde akışı ile birlikte gerçekleşen entropi transferleridir. $Q_{\text{çevre}} = -Q$ anlık çevre sıcaklığının T_0 olduğu durumda sistem sınırlarından olan zamana bağlı ısı transferi miktarıdır ve son olarak $Q_{\text{çevre}}/T_0$ ısı transferi yoluyla gerçekleşen entropi transferinin toplamıdır. (28) ve (30) nolu denklemlerden ısı transferi terimi yok edilir, potansiyel ve kinetik enerji farkları ihmal edilirse aşağıdaki denklem elde edilir.

$$W_{kh} = W_u = \sum m_{\text{g}} (h_{\text{g}} - T_0 s_{\text{g}}) - \sum m_{\text{ç}} (h_{\text{ç}} - T_0 s_{\text{ç}}) - T_0 S_{\text{üretim}} \quad (31)$$

Bu ifade, süreç esnasında gerçekleşen işi vermektedir. Aynı zamanda sürekli akışlı ünitelerin sınırlarının sabit olduğu, çevreye iş yapılmadığı durum için faydalı gücü veren ifadedir.

Denklem (31)'de entropi üretimi sıfır alınırsa, bu takdirde denklem birim zamandaki maksimum faydalı gücü (tersinir güç) verir.

$$W_{tr} = W_{u,\text{maksimum}} = \sum m_{\text{g}} (h_{\text{g}} - T_0 s_{\text{g}}) - \sum m_{\text{ç}} (h_{\text{ç}} - T_0 s_{\text{ç}}) \quad (32)$$

Akış ekserjisi, potansiyel ve kinetik ekserji farklarının ihmal edilebilir olması halinde şu şekilde yazılır;

$$\psi = m [(h - h_0) - T_0 (s - s_0)] \quad (33)$$

(32) ve (33) numaralı denklemler birlikte ele alındığında proses için birim zamandaki tersinir iş, birim zamanda birime giren ve çıkan ekserji akış miktarlarının farklarına eşittir.

$$W_{tr} = \sum \psi_g - \sum \psi_{\phi} \quad (34)$$

Gaz türbinli çevrimlerde, çevrim elemanlarını adyabatik kabul ederek ayrı ayrı ele alırsak;

Kompresöre verilen güç;

$$W_{u,k} = \sum m_{\phi,k} h_{\phi,k} - \sum m_{g,k} h_{g,k} \quad (35)$$

Yanma odasında yanma sonucu açığa çıkan ısı gücü;

$$Q_y = \sum m_{\phi,y} h_{\phi,y} - \sum m_{g,y} h_{g,y} = m_y H_u \quad (36)$$

Burada yanma odasında tam yanma olduğu ve kaybın bulunmadığı kabul edilerek yanma sonucu açığa çıkan ısı gücü m_y yakıtın kütleli debisi ve H_u alt ısı değeri çarpımına eşit olarak alınmıştır.

Türbinden alınan güç;

$$W_{u,t} = \sum m_{g,t} h_{g,t} - \sum m_{\phi,t} h_{\phi,t} \quad (37)$$

Çevrimin net gücü;

$$W_{u,\text{çevrim}} = W_{u,t} - W_{u,k} = [\sum m_{g,t} h_{g,t} - \sum m_{\phi,t} h_{\phi,t}] - [\sum m_{\phi,k} h_{\phi,k} - \sum m_{g,k} h_{g,k}] \quad (38)$$

olarak bulunur.

$$\sum m_{\phi,y} h_{\phi,y} - \sum m_{g,y} h_{g,y} = \sum m_{g,t} h_{g,t} - \sum m_{\phi,k} h_{\phi,k} = Q_y \quad (39)$$

olduğu göz önüne alınırsa;

$$W_{u,GT} = [\sum m_{g,k} h_{g,k} - \sum m_{\phi,t} h_{\phi,t}] + Q_y \quad (40)$$

bulunur. Böylece çevrimi bütün olarak ele alınarak elde edilen güç yukarıdaki eşitlikten hesaplanabilir. Gaz türbini çevrim için tersinir güç aşağıdaki ifadede bulunur.

$$W_{tr,GT} = \sum \psi_{g,k} - \sum \psi_{\phi,t} + Q_y \quad (41)$$

Birinci yasa uygulamasından adyabatik türbinde üretilen güç,

$$W_T = W_{u,T} = \sum m_g h_g - \sum m_{\phi} h_{\phi} \quad (42)$$

Diğer yandan, türbinlerdeki genişleme işlemindeki tersinmezlik tersinmezlik şu şekilde yazılabilir,

$$I_T = \sum \psi_g - \sum \psi_{\phi} - W_T \quad (43)$$

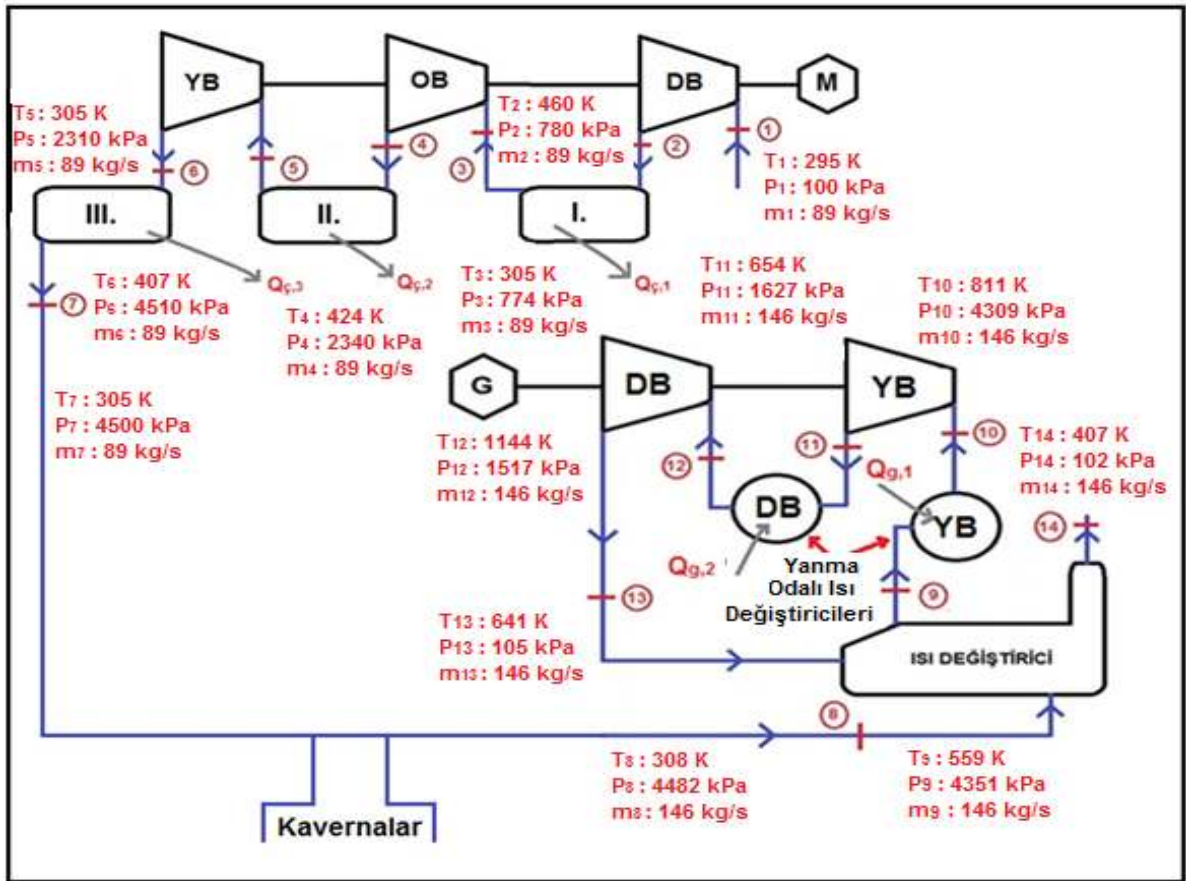
Bu prosesteki tersinir iş, türbine giren ve çıkan ekserjilerin eşittir.

$$W_{tr,T} = \sum \psi_g - \sum \psi_{\phi} \quad (44)$$

Bir sistem için termodinamiğin birinci ve ikinci yasaları esas alınarak verimler şu şekilde hesaplanabilir,

$$\eta_t = \frac{\sum W_u}{\sum Q_g} \quad \eta_{II} = \frac{\sum W_u}{\sum W_{tr}} \quad (45, 46)$$

12.1. Geleneksel Basıncı Hava Enerji Depolama Sistemi



Şekil 14. Geleneksel Sistemin Genel Görünümü (Crotagino, 2001)

Her üç sistemde de referans değerler olarak McIntosh santralinde elde edilen analiz değerleri alınmış ve modeller bunlar üzerine yapılmıştır.

Yanma odaları ve ısı değiştiricisi ile kombine çalışan basınçlı hava enerji depolama sisteminde dūřuk basınç kompresörüne giren T_1 sıcaklığında ve P_1 basıncındaki hava sıkıştırılarak T_2 sıcaklığında ve P_2 basıncında I. ara soğutucuya iletilir. Sıcaklığın artma miktarına bağlı olarak havanın özgül ağırlığının azalması ve bununda hava içindeki oksijen ağırlığının azalmasına neden olacağından dolayı ara soğutucular kullanılmaktadır. Bu sistemde ara soğutuculardan çıkan sıcaklık miktarları $Q_{,1}$, $Q_{,2}$ ve $Q_{,3}$ olarak gösterilmiş ve hesaplanmışlardır. I. ara soğutucudan ayrılan sıkıştırılmış hava T_3 sıcaklığında ve P_3 basıncında orta basınç kompresörüne iletilerek sıkıştırılma işlemine devam edilir. (şekil 15.1’de geleneksel sistemde basınçlandırma işleminin görünümü verilmiştir.)

Orta basınç kompresöründen ve sonrasında II. ara soğutucudan ayrılan hava T_5 sıcaklığında ve P_5 basıncında yüksek basınç kompresörüne iletilerek son sıkıştırılma işlemi gerçekleştirilir. Burada T_6 sıcaklığına ve P_6 basıncına ulaşan sıkıştırılmış hava son soğutucu olan III. soğutucudan da geçirilerek T_7 sıcaklığında ve P_7 basıncında kavernalara iletilir. (şekil 15.2’ de geleneksel sistemde basınçlandırma işleminin görünümü verilmiştir.) Basınçlandırma süresi boyunca kavernalarda sıkıştırılan ve sıcaklığı sabit kalarak basıncı artan hava, üretim sürecinde T_8 sıcaklığında ve P_8 basıncında ısı değiştiriciye iletilerek dūřuk basınç türbininin çıkan atık ısı ile sıcaklığı artırılarak T_9 sıcaklığında yüksek basınç yanma odasına iletilir. Burada sıkıştırılmış hava içerisine yakıt püskürtülmek suretiyle yakılır.

Buradaki yanma sonucunda basınç kayıplarının önüne geçilerek yüksek sıcaklığa ulaşılır. Yüksek sıcaklık ve basınç kavuşan hava T_{10} sıcaklığında ve P_{10} basıncında yüksek basınç türbinine iletilerek W_{YB} iři elde edilir. Yüksek basınç türbininin T_{11} sıcaklığında ve P_{11} basıncında ayrılan hava tekrar basınç kaybının önlenebilmesi ve yüksek sıcaklığa ulaşabilmesi için dūřuk basınç yanma odasına iletilerek yakıt ile yakılmaktadır. Artan sıcaklık ve basınç sahip hava T_{12} sıcaklığında ve P_{12} basıncında dūřuk basınç türbinine iletilerek W_{DB} iři elde edilir. Her iki türbinden elde edilen güç toplamı jeneratörü döndürerek elektrik enerjisi üretilmiş olur. (şekil 16’ da geleneksel sistemde üretim işleminin gösterimi

verilmiştir.) Bu arada düşün basınç türbininden çıkan atık ısı kavernadan çıkan basınçlı havanın sıcaklığını artırmak amacıyla ısı değiştiriciye iletilerek sistem içersine dahil edilmiş olur.

$$Q_{\zeta,1} = m (h_2 - h_3) = 89 \frac{\text{kg}}{\text{s}} (462,02 - 305,22) \text{kJ/kg} = 13955 \text{ kW}_h \quad (47)$$

$$Q_{\zeta,2} = m (h_4 - h_5) = 89 \frac{\text{kg}}{\text{s}} (425,26 - 305,22) \text{kJ/kg} = 10683 \text{ kW}_h \quad (48)$$

$$Q_{\zeta,3} = m (h_6 - h_7) = 89 \frac{\text{kg}}{\text{s}} (407,98 - 305,22) \text{kJ/kg} = 9145 \text{ kW}_h \quad (49)$$

$$Q_{\text{toplaml},\zeta} = Q_{\zeta,1} + Q_{\zeta,2} + Q_{\zeta,3} = 13955 + 10683 + 9145 = 33783 \text{ kW}_h \quad (50)$$

$$Q_{g,1} = m (h_{10} - h_9) = 146 \frac{\text{kg}}{\text{s}} (834,10 - 668,50) \text{kJ/kg} = 24178 \text{ kW}_h \quad (51)$$

$$Q_{g,2} = m (h_{12} - h_{11}) = 146 \frac{\text{kg}}{\text{s}} (1212,24 - 664,09) \text{kJ/kg} = 80029 \text{ kW}_h \quad (52)$$

$$Q_{\text{toplaml},g} = Q_{g,1} + Q_{g,2} = 24178 + 80029 = 104207 \text{ kW}_h \quad (53)$$

DB Kompresör için;

$$W_{DB,in} = m (h_2 - h_1) = 89 \frac{\text{kg}}{\text{s}} (462,02 - 295,17) \text{kJ/kg} = 14849 \text{ kW}_h \quad (54)$$

OB Kompresör için,

$$W_{OB,in} = m (h_4 - h_3) = 89 \frac{\text{kg}}{\text{s}} (425,26 - 305,22) \text{kJ/kg} = 10682 \text{ kW}_h \quad (55)$$

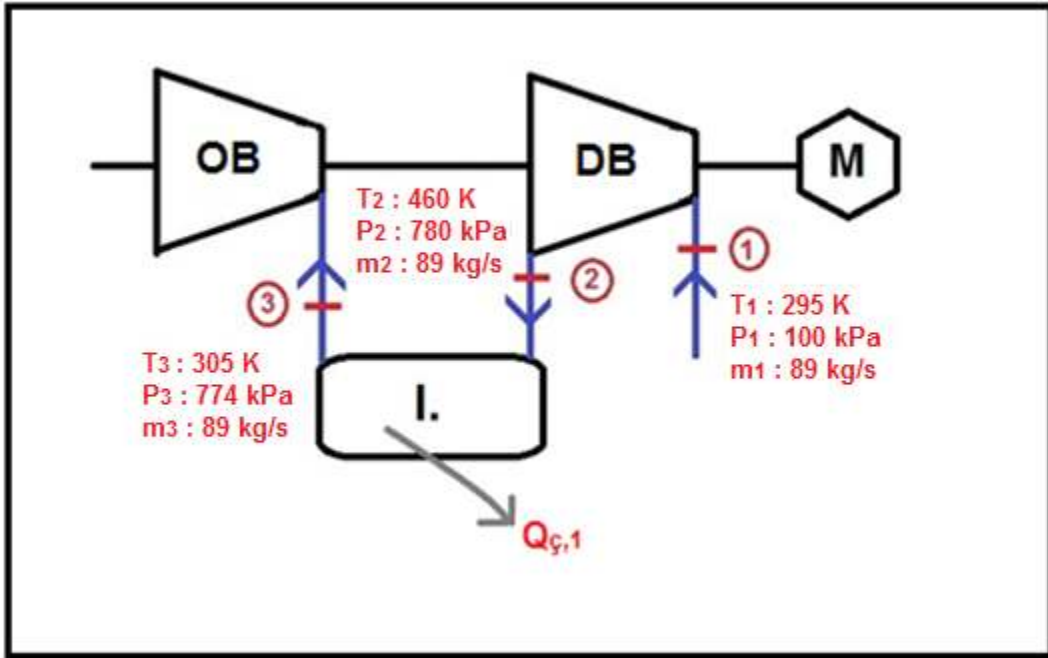
YB Kompresör için,

$$W_{YB,in} = m (h_6 - h_5) = 89 \frac{\text{kg}}{\text{sn}} (407,98 - 305,22) \text{kJ/kg} = 9145 \text{ kW}_h$$

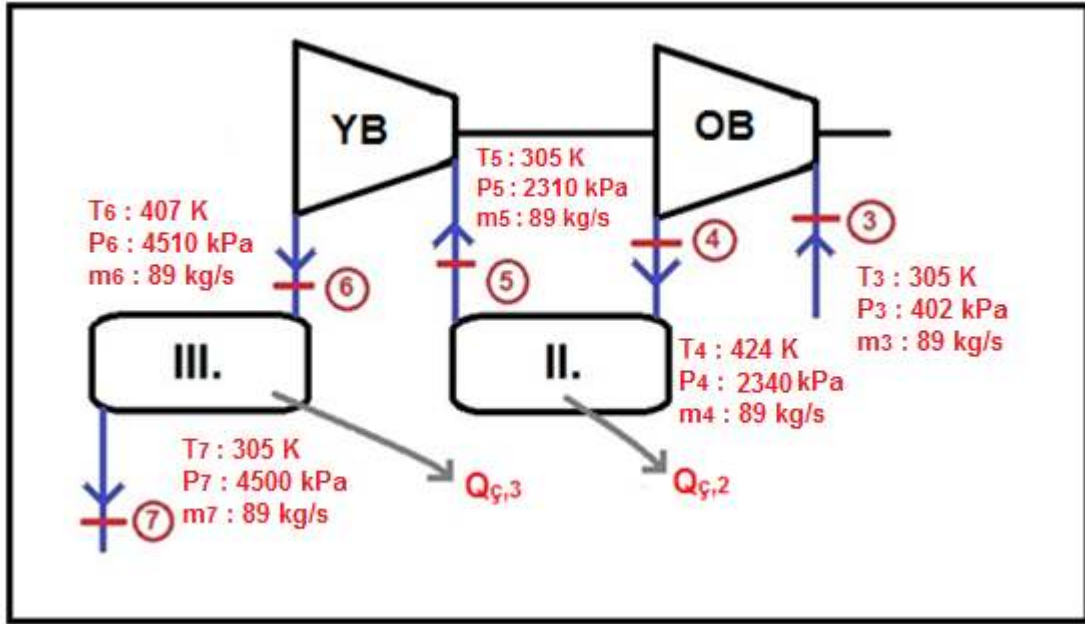
(56)

$$W_{toplaml,in} = W_{DB,in} + W_{OB,in} + W_{YB,in} = 34677 \text{ kW}_h$$

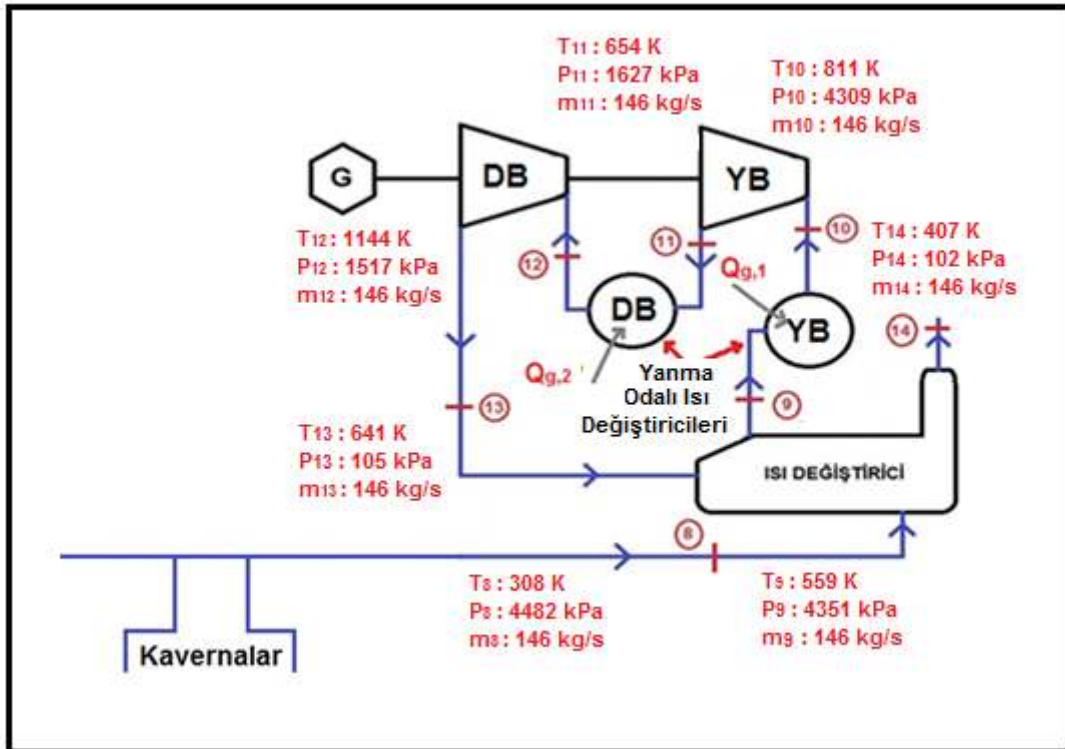
(57)



Şekil 15.1. Geleneksel Sistemde Basınçlandırma İşleminin Görünümü (Crotofino, 2001)



Şekil 15.2. Geleneksel Sistemde Basınçlandırma İşleminin Görünümü (Crotofino, 2001)



Şekil 16. Geleneksel Sistemde Üretim İşleminin Gösterimi (Crotofino, 2001)

$$\begin{aligned}
\dot{Q} - W_T &= \sum m_{\zeta} \left(h + V^2/2 + gz \right)_{\zeta} - \sum m_g \left(h + V^2/2 + gz \right)_g \\
-W_T &= \sum m_{\zeta} \cdot h_{\zeta} - \sum m_g \cdot h_g \\
-W_T &= m (h_{\zeta} - h_g)
\end{aligned} \tag{58}$$

YB Türbin için;

$$-W_{YB} = m (h_{11} - h_{10}) = 146 \frac{\text{kg}}{\text{s}} (664,84 - 833,95) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = - 24690 \text{ kW}_h \tag{59}$$

$$W_{YB,\zeta} = 24690 \text{ kW}_h$$

DB Türbin için;

$$-W_{DB} = m (h_{13} - h_{12}) = 146 \frac{\text{kg}}{\text{s}} (650,22 - 1212,17) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = - 82044 \text{ kW}_h \tag{60}$$

$$W_{DB,\zeta} = 82044 \text{ kW}_h$$

$$W_{toplaml,out} = W_{YB,\zeta} + W_{DB,\zeta} = 106734 \text{ kW}_h \tag{61}$$

Kompresör Verimleri;

DB Kompresör için,

$$T_1 = 295 \text{ K}$$

$$h_1 = 295,17 \text{ kJ/kg ise, } P_{r1} = 1.3068$$

$$P_{r2} = P_{r1} \left(\frac{P_2}{P_1} \right) = 1.3068 \left(\frac{410 \text{ kPa}}{100 \text{ kPa}} \right) = 5.3578 \quad (62)$$

$$P_{r2} = 5.3578 \text{ için } h_{2s} = 443,65 \text{ kJ/kg}$$

$$\eta_{DB} = \frac{h_{2s} - h_1}{h_2 - h_1} = \frac{(443,65 - 295,17) \text{ kJ/kg}}{(462,02 - 295,17) \text{ kJ/kg}} = 0,89 \quad (63)$$

$$\eta_{DB} = 0,89 = \% 89$$

OB Kompresör için,

$$T_3 = 305 \text{ K}$$

$$h_3 = 305,22 \text{ kJ/kg ise, } P_{r3} = 1.4686$$

$$P_{r4} = P_{r3} \left(\frac{P_4}{P_3} \right) = 1.4686 \left(\frac{1073 \text{ kPa}}{402 \text{ kPa}} \right) = 3.9190 \quad (64)$$

$$P_{r4} = 3.9190 \text{ için } h_{4s} = 404,68 \text{ kJ/kg}$$

$$\eta_{OB} = \frac{h_{4s} - h_3}{h_4 - h_3} = \frac{(404,68 - 305,22) \text{ kJ/kg}}{(425,26 - 305,22) \text{ kJ/kg}} = 0,83 \quad (65)$$

$$\eta_{OB} = 0,83 = \% 83$$

YB Kompresör için,

$$T_5 = 305 \text{ K}$$

$$h_5 = 305,22 \text{ kJ/kg ise, } P_{r5} = 1.4686$$

$$P_{r6} = P_{r5} \left(\frac{P_6}{P_5} \right) = 1.4686 \left(\frac{2454 \text{ kPa}}{1058 \text{ kPa}} \right) = 3.4063 \quad (66)$$

$$P_{r6} = 3.4063 \text{ için } h_{6s} = 390,28 \text{ kJ/kg}$$

$$\eta_{YB} = \frac{h_{6s} - h_5}{h_6 - h_5} = \frac{(390,28 - 305,22) \text{ kJ/kg}}{(407,98 - 305,22) \text{ kJ/kg}} = 0,83 \quad (67)$$

$$\eta_{YB} = 0,83 = \% 83$$

Türbin Verimleri,

YB Türbin için,

$$T_{11} = 654 \text{ K}$$

$$h_{11} = 664,09 \text{ kJ/kg ise, } P_{r11} = 22.368$$

$$P_{r11} = P_{r10} \left(\frac{P_{11}}{P_{10}} \right) \Rightarrow 22.368 = P_{r10} \left(\frac{1627 \text{ kPa}}{4309 \text{ kPa}} \right) \Rightarrow P_{r10} = 59.2401 \quad (68)$$

$$P_{r10} = 59.24 \text{ için } h_{10s} = 868,70 \text{ kJ/kg ve } h_{10a} = 834,06 \text{ kJ/kg}$$

$$\eta_{YB} = \frac{h_{10a} - h_{11}}{h_{10s} - h_{11}} = \frac{(834,06 - 664,09) \text{ kJ/kg}}{(868,70 - 664,09) \text{ kJ/kg}} = 0,83 \quad (69)$$

$$\eta_{YB} = 0,83 = \% 83$$

DB Türbin için,

$$T_{13} = 641 \text{ K}$$

$$h_{13} = 650,25 \text{ kJ/kg ise, } P_{r13} = 20.762$$

$$P_{r13} = P_{r12} \left(\frac{P_{13}}{P_{12}} \right) \Rightarrow 20.762 = P_{r12} \left(\frac{105 \text{ kPa}}{1517 \text{ kPa}} \right) \Rightarrow P_{r12} = 299.9614 \quad (70)$$

$$P_{r12} = 299.9614 \text{ için } h_{12s} = 1360,39 \text{ kJ/kg ve } h_{12a} = 1212,24 \text{ kJ/kg}$$

$$\eta_{DB} = \frac{h_{12a} - h_{13}}{h_{12s} - h_{13}} = \frac{(1212,24 - 650,25) \text{ kJ/kg}}{(1360,39 - 650,25) \text{ kJ/kg}} = 0,79 \quad (71)$$

$$\eta_{DB} = 0,79 = \% 79$$

Bu bölümde sistemi bileşeni olan kompresör, türbin ve yanma odalarının fiziksel ekserjileri hesaplanmıştır. Fiziksel ekserji, sistemin sıcaklığı T ve basıncı P olan ilk durumundan T_0 , P_0 halindeki çevre şartları ile termodinamik denge haline getirildiğinde sistemden elde edilecek maksimum iş olarak tanımlanır.

Kompresörlerin Ekserji Analizi

DB Kompresör için,

$$E_{DBK} = m [(h_1 - h_0) - T_0 (s_1 - s_0)] , T_0 = T_1 \text{ kabulü ile} \quad (72)$$

$$E_{DBK} = 89 \text{ kg/sn} [(295,17 - 104,83) \text{ kJ/kg} - 295 \text{ K} (1,3068 - 0,3672) \text{ kJ/kg}]$$

$$E_{DBK} = 4696 \text{ kW}_h$$

OB Kompresör için,

$$E_{OBK} = m [(h_4 - h_3) - T_3 (s_4 - s_3)] \quad (73)$$

$$E_{OBK} = 89 \text{ kg/sn} [(425,26 - 104,83) \text{ kJ/kg} - 305 \text{ K} (2,0509 - 1,7186) \text{ kJ/kg}]$$

$$E_{OBK} = 19499 \text{ kW}_h$$

YB Kompresör için,

$$E_{YBK} = m [(h_6 - h_5) - T_5 (s_6 - s_5)] \quad (74)$$

$$E_{YBK} = 89 \text{ kg/sn} [(407,98 - 305,22)\text{kJ/kg} - 305 \text{ K} (2,0095 - 1,7186)\text{kJ/kg}]$$

$$E_{YBK} = 1250 \text{ kW}_h$$

Yanma Odalarının Ekserji Analizi

YB Yanma Odası için,

$$E_{YBYO} = m [(h_{10} - h_9) - T_9 (s_{10} - s_9)] \quad (75)$$

$$E_{YBYO} = 146 \text{ kg/sn} [(833,95 - 555,20)\text{kJ/kg} - 559 \text{ K} (2,732 - 2,3349)\text{kJ/kg}]$$

$$E_{YBYO} = 8227 \text{ kW}_h$$

DB Yanma Odası için,

$$E_{DBYO} = m [(h_{12} - h_{11}) - T_{11} (s_{12} - s_{11})] \quad (76)$$

$$E_{DBYO} = 146 \text{ kg/sn} [(1212,17 - 664,84)\text{kJ/kg} - 654 \text{ K} (3,122 - 2,500)\text{kJ/kg}]$$

$$E_{DBYO} = 20445 \text{ kW}_h$$

Türbinlerin Ekserji Analizi

YB Türbin için,

$$E_{YBT} = m [(h_{10} - h_{11}) - T_{11} (s_{10} - s_{11})] \quad (77)$$

$$E_{YBT} = 146 \text{ kg/sn} [(833,95 - 664,84)\text{kJ/kg} - 654 \text{ K} (2,7328 - 2,500)\text{kJ/kg}]$$

$$E_{YBT} = 2470 \text{ kW}_h$$

DB Türbin için,

$$E_{DBT} = m [(h_{12} - h_{13}) - T_{13} (s_{12} - s_{13})] \quad (78)$$

$$E_{DBT} = 146 \text{ kg/sn} [(1212,17 - 650,22)\text{kJ/kg} - 641 \text{ K} (3,122 - 2,478)\text{kJ/kg}]$$

$$E_{DBT} = 21766 \text{ kW}_h$$

Sistemde Kaybedilen Toplam Ekserji,

$$Ex_g - Ex_{\dot{c}} - Ex_{yıkım} = 0 \quad (79)$$

$$54117 \text{ kW}_h - 24236 \text{ kW}_h - Ex_{yıkım} = 0$$

$$Ex_{y\u0131k\u0131m} = 29881 \text{ kW}_h$$

Sistemin Termal Verimi,

$$\eta_{th} = \frac{W_{net}}{Q_{in}} = \frac{W_{total,out} - W_{total,in}}{Q_{in}} = \frac{106734 \text{ kWh} - 34677 \text{ kWh}}{104207 \text{ kWh}} \quad (80)$$

$$\eta_{th} = 0,33 \text{ verim \%33}$$

Çizelge 4. Geleneksel Sistemde Basınçlandırma İşletme Verileri

Konum	Basınç [kpa]	Sıcaklık [K]	Debi [kg/s]
DB Kompresörü-Giriş	100	295	89
Birinci Ara Soğutucu-Giriş	780	460	89
OB Kompresörü-Giriş	774	305	89
İkinci Ara Soğutucu-Giriş	2340	424	89
YB Kompresörü-Giriş	2310	305	89
Son Soğutucu-Giriş	4510	407	89
Son Soğutucu-Çıkış	4500	305	89

Çizelge 5. Geleneksel Sistemde Üretim Operasyon Verileri

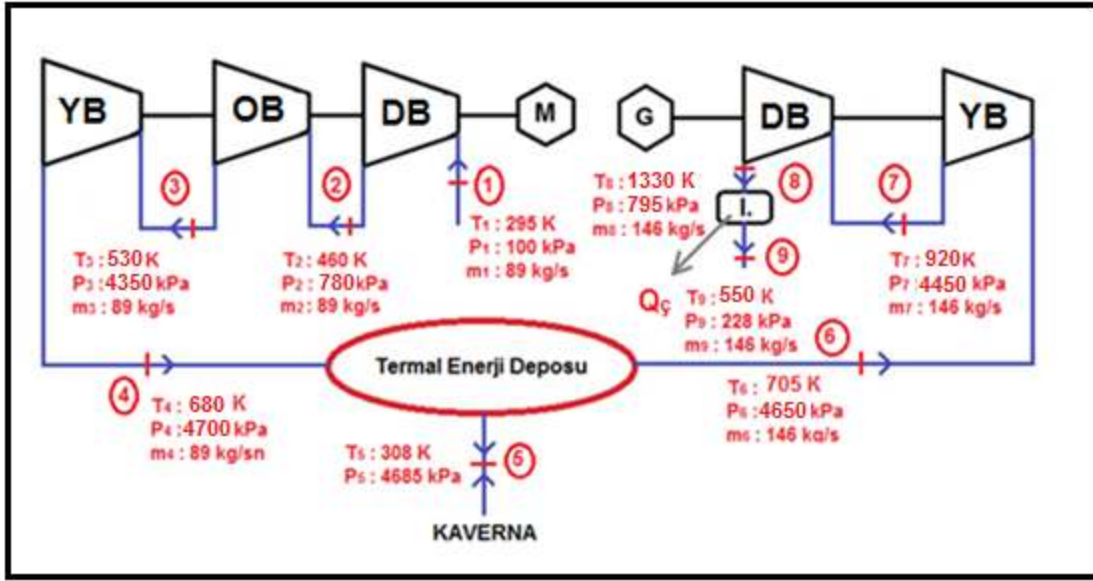
Konum	Sıcaklık [K]	Basınç [kPa]	Debi [kg/s]
Isı Değiştirici-Kaverna Giriş	308	4482	146
Yüksek Basınç Yanma Odası-Giriş	559	4351	146
YB Türbin-Giriş	811	4309	146
Alçak Basınç Yanma Odası-Giriş	654	1627	146
DB Türbin-Giriş	1144	1517	146
Isı Değiştirici-Egsoz Giriş	641	105	146
Isı Değiştirici-Çıkış	407	102	146

12.2. Isı Depolu Basıncılı Hava Enerji Depolama Sistemi

Isı depolu basınçlı hava enerji depolama sisteminde düşük basınç kompresörüne giren T_1 sıcaklığında ve P_1 basıncındaki hava sıkıştırılarak T_2 sıcaklığında ve P_2 basıncında orta basınç kompresörüne iletilerek sıkıştırılma işlemine devam edilir.(Şekil 18’de ısı depolu sistemde basınçlandırma işleminin genel görünümü verilmiştir.) Orta basınç kompresöründen ayrılan hava T_3 sıcaklığında ve P_3 basıncında yüksek basınç kompresörüne iletilerek son sıkıştırılma işlemi gerçekleştirilir.

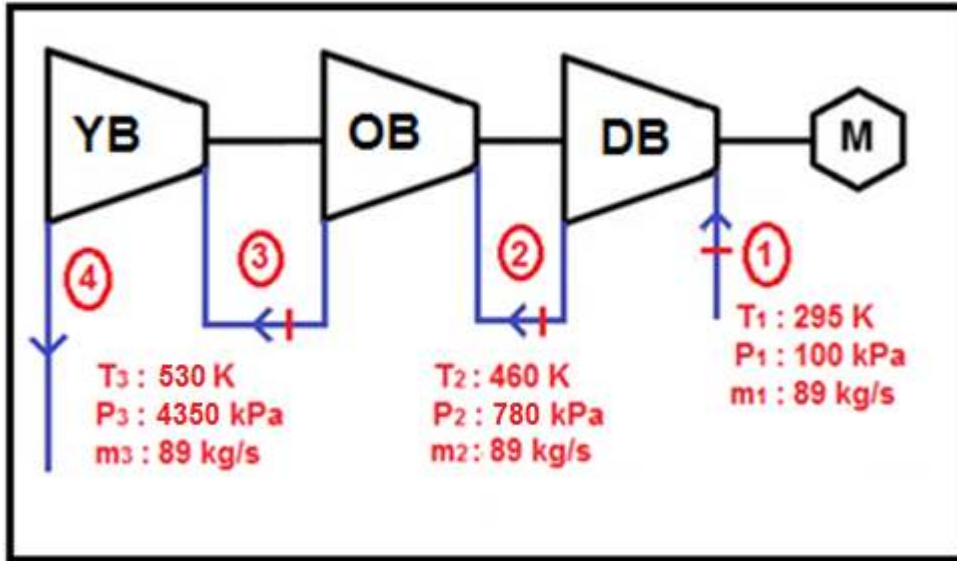
Burada T_4 sıcaklığına ve P_4 basıncına ulaşan sıkıştırılmış hava termal ısı deposu içerisinden geçirilerek T_5 sıcaklığında kavernalara iletilir. Üretim sırasında kavernalar içersinde depolanmış olan hava P_5 basıncında ve T_5 sıcaklığında termal ısı deposundan geçirilerek bir miktar basınç kaybıyla birlikte P_6 basıncında ve artan T_6 sıcaklığında yüksek basınç türbinine iletilerek türbinden W_{YB} işi elde edilir. (Şekil 19’da ısı depolu sistemde üretim işleminin genel görünümü verilmiştir.)

Yüksek basınç türbininden T_7 sıcaklığında ve P_7 basıncında ayrılan hava düşük basınç türbinine iletilerek W_{DB} işi elde edilir. Her iki türbinden elde edilen güç toplamı jeneratörü döndürerek elektrik enerjisi üretilmiş olur. Bu arada düşük basınç türbininden çıkan atık ısı I. soğutucudan geçirilerek ısının çevreye zarar vermeyecek miktarlara indirgenmesi sağlanır.



Şekil 17. Isı Depolu Sistemin Genel Görünümü (Milazzo, 2009)

$$Q_{\dot{c}} = m (h_8 - h_9) = 146 \frac{\text{kg}}{\text{s}} (1431,76 - 955,38) \text{ kJ/kg} = 69551 \text{ kW}_h \quad (81)$$



Şekil 18. Isı Depolu Sistemde Basınçlandırma İşleminin Genel Görünümü (Milazzo, 2009)

DB Kompresör için;

$$W_{DB,g} = m (h_2 - h_1) = 89 \frac{\text{kg}}{\text{s}} (462,02 - 295,17) \text{kJ/kg} = 14849 \text{ kW}_h \quad (82)$$

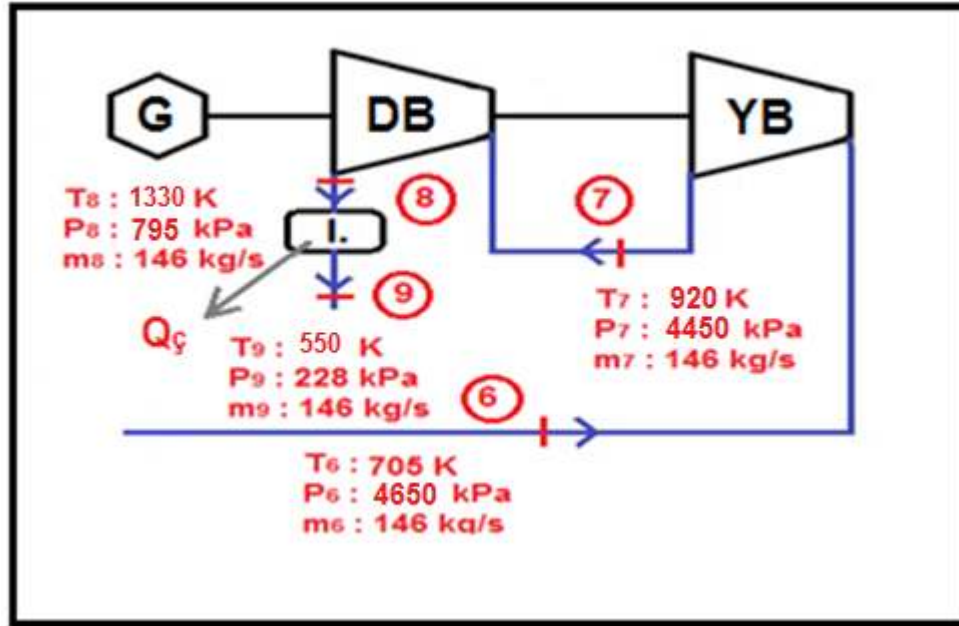
OB Kompresör için,

$$W_{OB,g} = m (h_3 - h_2) = 89 \frac{\text{kg}}{\text{s}} (533,98 - 462,02) \text{kJ/kg} = 6404 \text{ kW}_h \quad (83)$$

YB Kompresör için,

$$W_{YB,g} = m (h_4 - h_3) = 89 \frac{\text{kg}}{\text{sn}} (681,14 - 533,98) \text{kJ/kg} = 13097 \text{ kW}_h \quad (84)$$

$$W_{toplaml,g} = W_{DB,g} + W_{OB,g} + W_{YB,g} = 34350 \text{ kW}_h$$



Şekil 19. Isı Depolu Sistemde Üretim İşleminin Genel Görünümü (Milazzo, 2009)

$$\dot{Q} - W_T = \sum m_{\zeta} \left(h + V^2/2 + gz \right)_{\zeta} - \sum m_g \left(h + V^2/2 + gz \right)_g$$

$$- W_T = \sum m_{\zeta} \cdot h_{\zeta} - \sum m_g \cdot h_g$$

$$- W_T = m (h_{\zeta} - h_g) \quad (85)$$

YB Türbin için;

$$W_{YB} = m (h_7 - h_6) = 146 \frac{\text{kg}}{\text{s}} (955,38 - 718,40) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 34599 \text{ kW}_h$$

(86)

$$W_{YB,\zeta} = 34599 \text{ kW}_h$$

DB Türbin için;

$$W_{DB} = m (h_8 - h_7) = 146 \frac{\text{kg}}{\text{s}} (1431,76 - 955,38) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 69551 \text{ kW}_h \quad (87)$$

$$W_{DB,\zeta} = 69551 \text{ kW}_h$$

$$W_{toplam,\zeta} = W_{YB,\zeta} + W_{DB,\zeta} = 104150 \text{ kW}_h$$

Sistem Bileşenlerinin Ekserji Analizi

Bu bölümde sistemi bileşeni olan kompresör, türbin ve yanma odalarının fiziksel ekserjileri hesaplanmıştır. Fiziksel ekserji, sistemin sıcaklığı T ve basıncı P olan ilk durumundan T_o , P_o halindeki çevre şartları ile termodinamik denge haline getirildiğinde sistemden elde edilecek maksimum iş olarak tanımlanır.

Kompresörlerin Ekserji Analizi

DB Kompresör için,

$$E_{DBK} = m [(h_1 - h_0) - T_0 (s_1 - s_0)] , T_0 = T_1 \text{ kabulü ile} \quad (88)$$

$$E_{DBK} = 89 \text{ kg/sn} [(295,17 - 104,83)\text{kJ/kg} - 295 \text{ K} (1,3068 - 0,3672)\text{kJ/kg}]$$

$$E_{DBK} = 7728 \text{ kW}_h$$

OB Kompresör için,

$$E_{OBK} = m [(h_3 - h_2) - T_2 (s_3 - s_2)] \quad (89)$$

$$E_{OBK} = 89 \text{ kg/sn} [(533,98 - 462,02)\text{kJ/kg} - 460 \text{ K} (2,2796 - 2,1341)\text{kJ/kg}]$$

$$E_{OBK} = 6337 \text{ kW}_h$$

YB Kompresör için,

$$E_{YBK} = m [(h_4 - h_3) - T_4 (s_4 - s_3)] \quad (90)$$

$$E_{YBK} = 89 \text{ kg/sn} [(681,14 - 533,98)\text{kJ/kg} - 680 \text{ K} (2,5258 - 2,2796)\text{kJ/kg}]$$

$$E_{YBK} = 12929 \text{ kW}_h$$

Türbinlerin Ekserji Analizi

YB Türbin için,

$$E_{YBT} = m [(h_6 - h_7) - T_7 (s_6 - s_7)] \quad (91)$$

$$E_{YBT} = 146 \text{ kg/sn} [(718,66 - 955,38)\text{kJ/kg} - 920 \text{ K} (2,5800 - 2,8732)\text{kJ/kg}]$$

$$E_{YBT} = 34292 \text{ kW}_h$$

DB Türbin için,

$$E_{DBT} = m [(h_7 - h_8) - T_8 (s_7 - s_8)] \quad (92)$$

$$E_{DBT} = 146 \text{ kg/sn} [(955,38 - 1431,76)\text{kJ/kg} - 1330 \text{ K} (2,8732 - 3,3006)\text{kJ/kg}] = 68983 \text{ kW}_h$$

Sistemde Kaybedilen Toplam Ekserji,

$$Ex_g - Ex_{\dot{c}} - Ex_{yıkım} = 0 \quad (93)$$

$$26994 \text{ kW}_h - 21121 \text{ kW}_h - Ex_{yıkım} = 0$$

$$Ex_{yıkım} = 5873 \text{ kW}_h$$

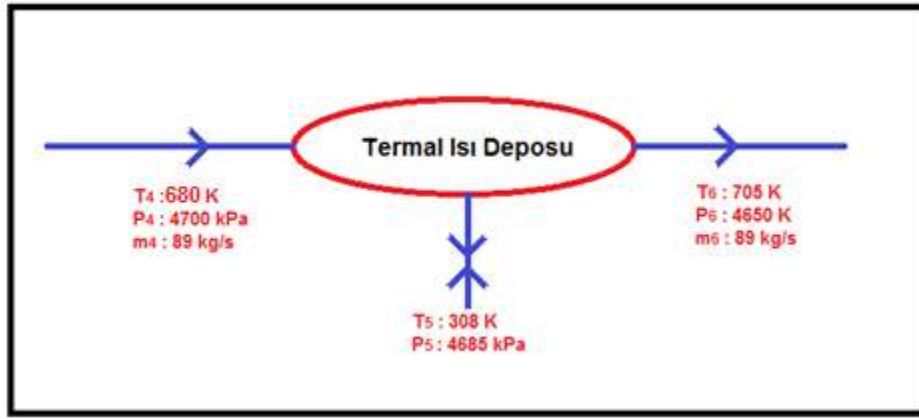
Sistemin Termal Verimi,

$$\eta_{th} = \frac{W_{net}}{Q_{in}} = \frac{W_{total,out} - W_{total,in}}{Q_{in}} = \frac{104150 \text{ kWh} - 34350 \text{ kWh}}{26693 \text{ kWh}} \quad (94)$$

$$\eta_{th} = 0,39 \text{ verim } \%39$$

ISI DEPOSUNUN TERMODİNAMİK ANALİZİ

Isı deposunun enerji ve ekserjilerinin incelenmesi kapsamında depoya giren ve çıkan havanın debilerinin sabit olduğu kabul edilmiştir.



Şekil 20. Isı Deposunun Genel Görünümü (Milazzo, 2009)

Enerji Verimi:

$$\dot{Q}_{input} = \dot{m} (h_4 - h_5) = 89 \frac{\text{kg}}{\text{s}} (681,14 - 308,25) \text{ kJ/kg} = 33187 \text{ kW}_h \quad (95)$$

$$\dot{Q}_{output} = \dot{m} (h_6 - h_5) = 89 \frac{\text{kg}}{\text{s}} (718,66 - 308,25) \text{ kJ/kg} = 36526 \text{ kW}_h \quad (96)$$

$$\dot{Q}_{recovered} = \dot{Q}_{input} - \dot{Q}_{output} = 37964 \text{ kW} - 36526 \text{ kW} = 1438 \text{ kW}_h \quad (97)$$

$$\frac{\dot{Q}_{recovered}}{\dot{Q}_{input}} = \frac{1438 \text{ kWh}}{33187 \text{ kWh}} = 0,04 = \dot{Q}_{kayıp} \quad (98)$$

0,04 kayıptan görüldüğü üzere ısı deposu % 96 verimle çalışmaktadır.

Ekseji Analizi.

$$\epsilon_{x_{input}} = \dot{m} [(h_4 - h_5) - T_5 (s_4 - s_5)] \quad (99)$$

$$= 89 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \left[681,14 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} - 308,25 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} - 308 \text{ K} (2,5258 - 1,7284) \text{ kJ/kgK} \right] = 11329 \text{ kW}_h$$

$$\epsilon_{x_{output}} = \dot{m} [(h_6 - h_5) - T_5 (s_6 - s_5)] \quad (100)$$

$$= 89 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \left[718,66 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} - 308,25 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} - 308 \text{ K} (2,5804 - 1,7284) \text{ kJ/kgK} \right] = 13171 \text{ kW}_h$$

Isı Deposunda Kaybedilen Toplam Ekserji.

$$\epsilon_{x_{input}} - \epsilon_{x_{output}} - \epsilon_{x_{yıkım}} = 0 \quad (101)$$

$$11329 \text{ kW}_h - 13171 \text{ kW}_h - \epsilon_{x_{yıkım}} = 0 \quad \text{için} \quad \epsilon_{x_{yıkım}} = 1842 \text{ kW}_h$$

Çizelge 6. Isı Depolu Sistemde Basınçlandırma İşletme Verileri

Konum	Basınç [kpa]	Sıcaklık [K]	Debi [kg/s]
DB Kompresörü-Giriş	100	295	89
OB Kompresörü-Giriş	780	460	89
YB Kompresörü-Giriş	4350	530	89
Termal Enerji Deposu-Giriş	4700	680	89
Termal Enerji Deposu -Çıkış	4650	705	146

Çizelge 7. Isı Depolu Sistemde Üretim Operasyon Verileri

Konum	Sıcaklık [K]	Basınç [kPa]	Debi [kg/s]
Termal Enerji Deposu -Çıkış	705	4650	146
YB Türbin-Giriş	705	4650	146
DB Türbin-Giriş	920	4450	146
I.Soğutucu-Giriş	1330	795	146
I.Soğutucu-Çıkış	550	228	146

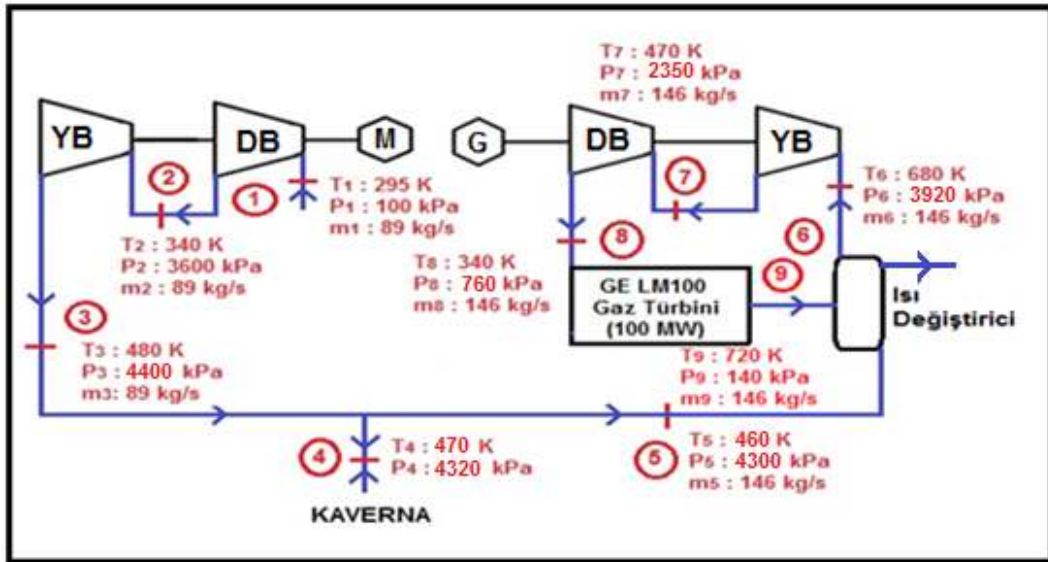
12.3. Gaz Türbini ile Kombine Çalışan Basıncılı Hava Depolama Sistemi

Gaz türbini ile kombine çalışan basıncılı hava enerji depolama sisteminde düşük basınç kompresörüne giren T_1 sıcaklığında ve P_1 basıncındaki hava sıkıştırılarak T_2 sıcaklığında ve P_2 basıncında orta basınç kompresörüne iletilerek sıkıştırılma işlemine devam edilir. Bu işlemler sonucunda T_3 sıcaklığına ve P_3 basıncına ulaşan sıkıştırılmış hava üretim süreci için kavernalara T_4 sıcaklığında ve P_4

basıncında iletilir. (Şekil 21’de gaz türbini ile kombine çalışan sistemin genel görünümü verilmiştir.)

Kavernalarda depolanarak sıcaklığı T_5 ve basıncı P_5 değerlerine ulaşan hava ısı değiştiriciden geçerek T_6 sıcaklığında ve P_6 basıncında yüksek basınç türbinine iletilerek W_{YB} işi elde edilir. Yüksek basınç türbininden T_7 sıcaklığında ve P_7 basıncında ayrılan hava düşük basınç türbinine iletilerek W_{DB} işi elde edilir (Şekil 22’de gaz türbini ile kombine çalışan sistemde basınçlandırma işleminin gösterimi verilmiştir). Her iki türbinden elde edilen güç toplamı jeneratörü döndürerek elektrik enerjisi üretilmiş olur.

Düşük basınç türbininden gelen T_8 sıcaklığında P_8 basıncına sahip hava bu sistemle kombine çalışan GE LM100 gaz türbininden geçirilerek türbinden W_{GT} işi elde edilir. Gaz türbininde havanın yakılarak sıcaklığının ve basıncının artırılması için 200 kg/s yakıt yakması sağlanmaktadır. Ayrıca gaz türbininden çıkan atık ısı T_9 sıcaklığında ve P_9 basıncında sistem içersindeki ısı değiştiriciye iletilerek kavernadan gelen basınçlı hava için kullanılmaktadır.



DB Kompresör için;

$$W_{DB,g} = m (h_2 - h_1) = 89 \frac{\text{kg}}{\text{s}} (340,42 - 295,17) \text{ kJ/kg} = 4027 \text{ kW}_h \quad (102)$$

YB Kompresör için,

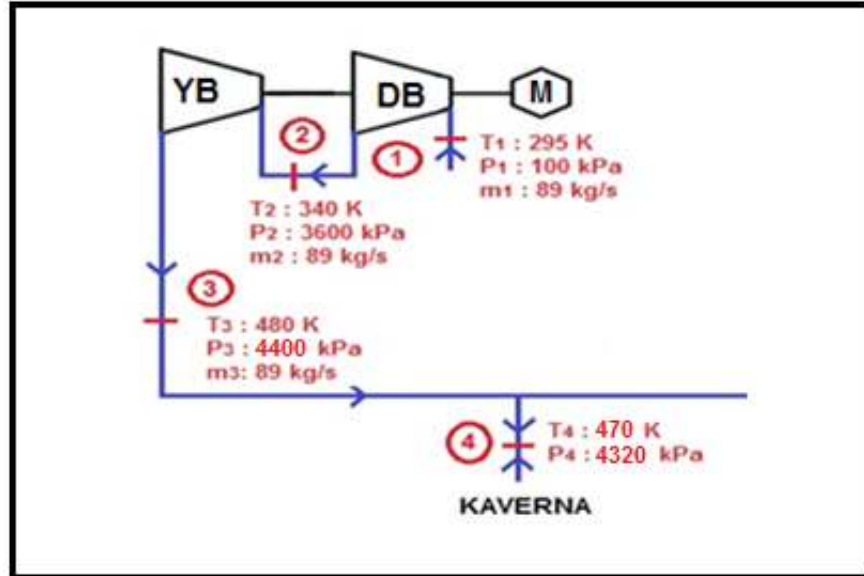
$$W_{YB,g} = m (h_3 - h_2) = 89 \frac{\text{kg}}{\text{s}} (482,49 - 340,42) \text{ kJ/kg} = 12644 \text{ kW}_h \quad (103)$$

$$W_{toplaml,g} = W_{YB,g} + W_{DB,g} = 16671 \text{ kW}_h$$

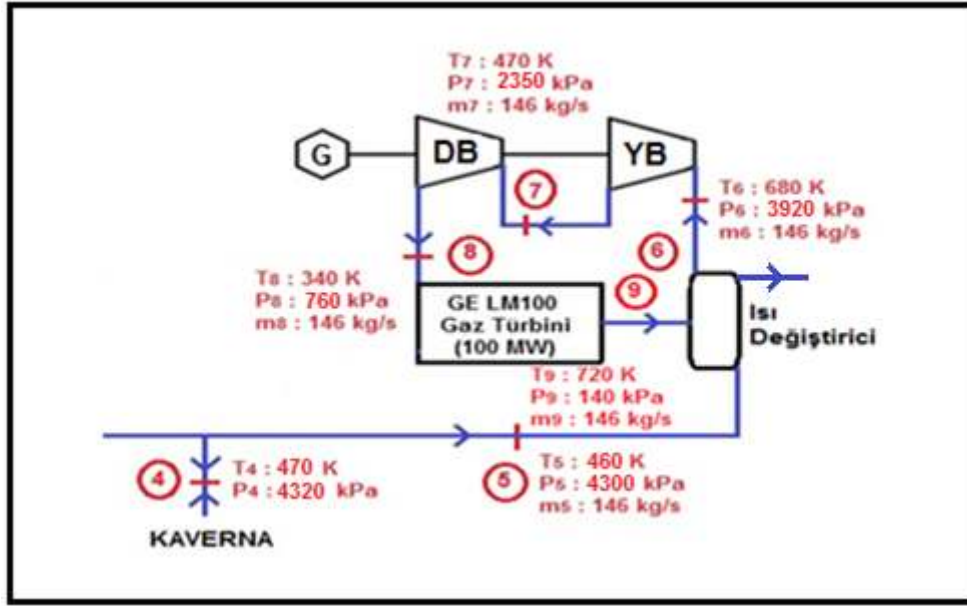
$$\dot{Q} - W_T = \sum m_{\dot{\varsigma}} \left(h + \frac{V^2}{2} + gz \right)_{\dot{\varsigma}} - \sum m_g \left(h + \frac{V^2}{2} + gz \right)_g$$

$$-W_T = \sum m_{\dot{\varsigma}} \cdot h_{\dot{\varsigma}} - \sum m_g \cdot h_g$$

$$-W_T = m (h_{\dot{\varsigma}} - h_g) \quad (104)$$



Şekil 22. Gaz Türbini İle Kombine Çalışan Sistemde Basınçlandırmanın Gösterimi
(Nakhamkin, 2008)



Şekil 23. Gaz Türbini İle Kombine Çalışan Sistemde Üretim İşleminin Gösterimi
(Nakhamkin, 2008)

YB Türbin için;

$$-W_{YB} = m(h_6 - h_7) = 146 \frac{\text{kg}}{\text{s}} (691,82 - 472,24) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = -32058 \text{ kW}_h \quad (105)$$

$$W_{YB,\zeta} = 32058 \text{ kW}_h$$

DB Türbin için;

$$-W_{DB} = m(h_7 - h_8) = 146 \frac{\text{kg}}{\text{s}} (472,24 - 340,42) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = -19245 \text{ kW}_h \quad (106)$$

$$W_{DB,\zeta} = 19245 \text{ kW}_h$$

$$W_{toplam,\zeta} = W_{YB,\zeta} + W_{DB,\zeta} + W_{gaz \text{ türbini}} = 151303 \text{ kW}_h$$

Sistem Bileşenlerinin Ekserji Analizi

Bu bölümde sistemi bileşeni olan kompresör, türbin ve yanma odalarının fiziksel ekserjileri hesaplanmıştır. Fiziksel ekserji, sistemin sıcaklığı T ve basıncı P olan ilk durumundan T_0 , P_0 halindeki çevre şartları ile termodinamik denge haline getirildiğinde sistemden elde edilecek maksimum iş olarak tanımlanır.

Kompresörlerin Ekserji Analizi

DB Kompresör için,

$$E_{DBK} = m [(h_1 - h_0) - T_0 (s_1 - s_0)] , T_0 = T_1 \text{ kabulü ile} \quad (107)$$

$$E_{DBK} = 89 \text{ kg/sn} [(295,17 - 104,83)\text{kJ/kg} - 295 \text{ K} (1,6852 - 0,3672)\text{kJ/kg}]$$

$$E_{DBK} = 17663 \text{ kW}_h$$

YB Kompresör için,

$$E_{YBK} = m [(h_3 - h_2) - T_2 (s_3 - s_2)] \quad (108)$$

$$E_{YBK} = 89 \text{ kg/sn} [(482,49 - 340,42)\text{kJ/kg} - 340 \text{ K} (2,1776 - 1,8279)\text{kJ/kg}]$$

$$E_{YBK} = 2062 \text{ kW}_h$$

Türbinlerin Ekserji Analizi

YB Türbin için,

$$E_{YBT} = m [(h_6 - h_7) - T_7 (s_6 - s_7)] \quad (109)$$

$$E_{YBT} = 146 \text{ kg/sn} [(691,52 - 472,24)\text{kJ/kg} - 470 \text{ K} (2,5418 - 2,1560)\text{kJ/kg}]$$

$$E_{YBT} = 5541 \text{ kW}_h$$

DB Türbin için,

$$E_{DBT} = m [(h_7 - h_8) - T_8 (s_7 - s_8)] \quad (110)$$

$$E_{DBT} = 146 \text{ kg/sn} [(472,24 - 340,42) \text{ kJ/kg} - 340 \text{ K} (2,1560 - 1,8279) \text{ kJ/kg}]$$

$$E_{DBT} = 2959 \text{ kW}_h$$

Sistemde Kaybedilen Toplam Ekserji,

$$Ex_g - Ex_{\dot{c}} - Ex_{yikimi} = 0 \quad (111)$$

$$19725 \text{ kW}_h - 8500 \text{ kW}_h - Ex_{yikimi} = 0$$

$$Ex_{yikimi} = 11225 \text{ kW}_h$$

Sistemin Termal Verimi,

$$\eta_{th} = \frac{W_{net}}{Q_{in}} = \frac{W_{total,out} - W_{total,in}}{Q_{in}} = \frac{151303 \text{ kW} - 16671 \text{ kW}}{100230 \text{ kW}} \quad (112)$$

$$\eta_{th} = 0,34 \text{ verim \%34}$$

Çizelge 8. Gaz Türbini İle Kombine Çalışan Sistemde Basınçlandırma İşletme Verileri

Konum	Basınç [kpa]	Sıcaklık [K]	Debi [kg/s]
DB Kompresörü-Giriş	100	295	89
YB Kompresörü-Giriş	3600	340	89

Çizelge 9. Gaz Türbini İle Kombine Çalışan Sistemde Üretim İşletme Verileri

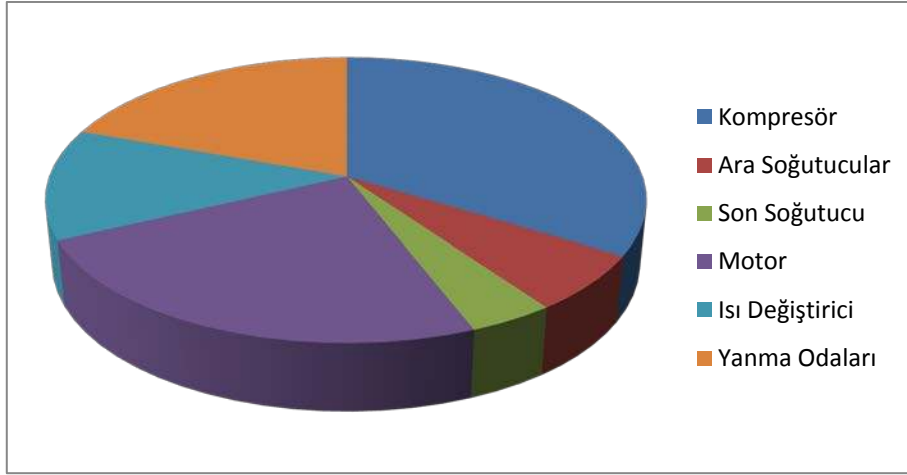
Konum	Sıcaklık [K]	Basınç [kPa]	Debi [kg/s]
Kaverna –Çıkış	460	4300	146
Isı Değiştirici – Giriş	460	4300	146
YB Türbin-Giriş	680	3920	146
DB Türbin-Giriş	470	2350	146
GE Gaz Türbin-Giriş	340	760	146
GE Gaz Türbin-Çıkış	720	140	146

13. SİSTEMLERİN EKONOMİK ANALİZLERİ

13.1. Geleneksel Sistemin Ekonomik Analizi

Çizelge 10. Geleneksel Sistemin Ekipman Maliyetleri (Bozzolani,2010)

Ekipman	Ortalama Maliyet (\$)
YB Kompresör	\$ 8.200.000
OB Kompresör	\$ 8.500.000
DB Kompresör	\$ 8.800.000
Motor	\$ 18.000.000
1. Ara Soğutucu	\$ 2.300.000
2. Ara Soğutucu	\$ 2.500.000
Son Soğutucu	\$ 3.000.000
Isı Değiştirici	\$ 9.500.000
YB Yanma Odası	\$ 7.500.000
OB Yanma Odası	\$ 7.200.000
YB Türbin	\$ 16.500.000
DB Türbin	\$ 15.000.000
Jeneratör	\$ 23.500.000
Toplam	\$ 130.500.000



Grafik 1. Geleneksel Sistemin Ekipman Maliyetinin Dağılımı (%)

Çizelge 11. Geleneksel Sistemde On Yıllık Amortisman Dağılımı

YILLAR	DURAN VARLIĞIN DEĞERİ	AMORTİSMAN	YILLIK AMORTİSMAN	BİRİKMİŞ AMORTİSMAN
2015	91.350.000 USD	0.10	9.135.000 USD	82.215.000 USD
2016	91.350.000 USD	0.10	9.135.000 USD	73.080.000 USD
2017	91.350.000 USD	0.10	9.135.000 USD	63.945.000 USD
2018	91.350.000 USD	0.10	9.135.000 USD	54.810.000 USD
2019	91.350.000 USD	0.10	9.135.000 USD	45.675.000 USD
2020	91.350.000 USD	0.10	9.135.000 USD	36.540.000 USD
2021	91.350.000 USD	0.10	9.135.000 USD	27.405.000 USD
2022	91.350.000 USD	0.10	9.135.000 USD	18.270.000 USD
2023	91.350.000 USD	0.10	9.135.000 USD	9.135.000 USD
2024	91.350.000 USD	0.10	9.135.000 USD	---

Çizelge 12. Geleneksel Sistemin Toplam Yatırım Maliyetleri

Toplam Yatırım Maliyeti (\$)	
PIC (+5% liste dışı maliyetler)	\$ 137.025.000
PSBC	\$ 20.000.000
Arazi Geliştirme Maliyeti	\$ 7.500.000
Proje ve Yerinde Test Maliyetleri	\$ 5.000.000
Kaverna Geliştirme Maliyeti	\$ 35.000.000
Başlangıç Yedek Parça Maliyeti	\$ 3.500.000
Toplam Direk Maliyetler	\$ 208.025.000
Dolaylı Maliyetler	\$ 15.000.000
Öngörülemez Maliyetler (15% TDM)	\$ 31.203.750
Toplam Yatırım Maliyeti	\$ 254.228.750

PIC: Toplam satın alma ve montaj maliyeti

PSBC : Sistem servis maliyeti

Sistemin Ekonomik Analizi

Sistemin ekonomik analizi sırasında toplam yatırım maliyetinin yanında işletme sırasındaki maliyet-kazanç oranı ve sistemin geri ödeme süreside ön plana çıkmaktadır.

Bu kapsamda yapılan çalışma modeli basınçlandırma ve üretim olarak iki kısma ayırma ile mümkün olmaktadır.

Basınçlandırma : Günde 10 saat, 4.5 gün

Üretim : Günde 7 saat, 3.5 gün

1 Tam Çevrim : 8 gün

Yılda 40 çevrim ve 320 gün çalışma kabülü ile,

Basınçlandırma:

$4.5 \text{ gün} \times 10 \text{ saat} \times 40 \text{ çevrim} \times 34,677 \text{ MWe-saat} : 62\,418 \text{ MWe-saat}$ yıllık tüketim

$62\,418 \text{ MWe-saat} \times 0,20 \text{ TL kW-saat} : 124\,836\,000 \text{ TL}$

Üretim:

$3.5 \text{ gün} \times 7 \text{ saat} \times 40 \text{ çevrim} \times 106,734 \text{ MWe-saat} : 104\,599 \text{ MWe-saat}$ yıllık üretim

$104\,599 \text{ MWe-saat} \times 0,30 \text{ TL kW-saat} : 313\,797\,000 \text{ TL}$

Diğer Giderler:

Yakıt gideri + O.&M. (operasyon bakım onarım)

Yakıt gideri : Yanma odaları için sn'de toplam 8 kg yakıt tüketimi kabulü ile,

7 gün x 3600 sn x 8 kg : 201 600 kg tek çevrim x 40 çevrim : 8 064 000 kg/yıl

1 m³ doğal gazın 0,67 kg karşılığında, yıllık tüketim 12 035 821 m³ 'tür.

1000 m³ gazın 400 USD bedeli kabulü ile, yıllık gaz tüketimi 4 814 328 USD (1,75 TL kur)

O&M gideri, basınçlandırma maliyetinin % 2,5'i kabulü ile 3 120 900 TL

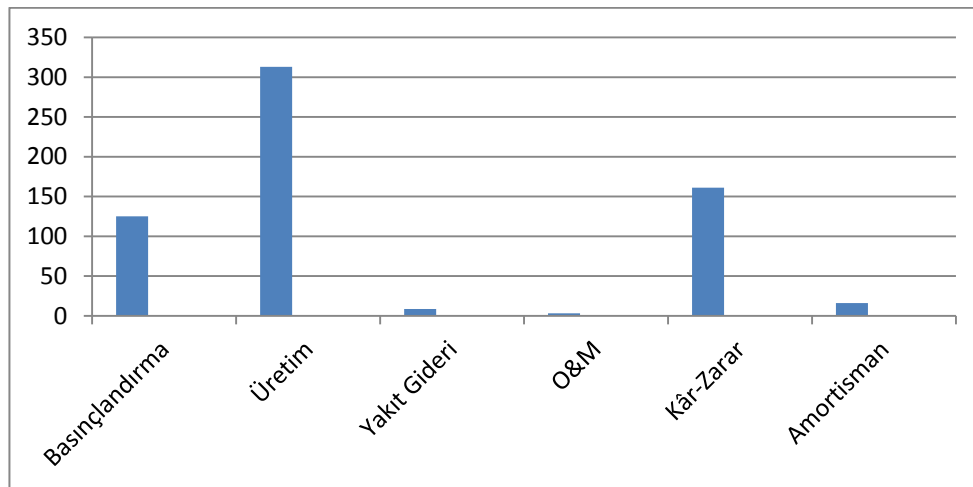
On yıllık amortisman gideri 91 350 000 USD (1,75 TL kur)

Yıllık Operasyon Kâr / Zarar Durumu:

Üretim kazancı – basınçlandırma maliyeti – yakıt gideri – O&M gideri – Amortisman = Kâr / Zarar

313 797 000 TL – 124 836 000 TL – 8 425 074 TL – 3 120 900 – 15 986 250

= 161 428 776 TL



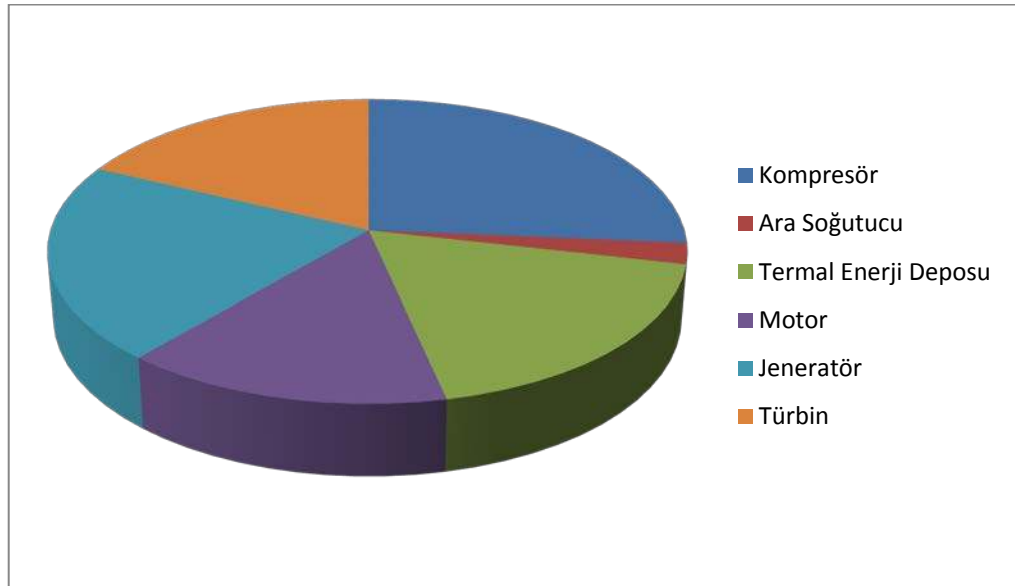
Grafik 2. Geleneksel Sistemin Ekonomik Analiz Gösterimi (Milyon TL)

Yukarıdaki hesaplamalar gece basınçlandırma, gündüz üretim süreçleri kapsamında bir yıllık toplam çevrim sayıları ve gece ile gündüz elektrik kW_h fiyat farkları göz önüne alınarak yapılmıştır. Bu sistemin toplam yatırım maliyet kalemleri, finans, amortisman ve yıllık operasyon kârı değerlendirilmesi sonucunda sistemin kendini yaklaşık 5,5 yılda ödediği ortaya çıkmaktadır.

13.2. Isı Depolu Sistemin Ekonomik Analizi

Çizelge 13. Isı Depolu Sistemin Ekipman Maliyetleri (Bozzolani,2010)

Ekipman	Ortalama Maliyet (\$)
YB Kompresör	\$ 6.500.000
OB Kompresör	\$ 12.500.000
DB Kompresör	\$ 8.000.000
Motor	\$ 15.000.000
I. Ara Soğutucu	\$ 2.300.000
Termal Enerji Deposu	\$ 18.500.000
YB Türbin	\$ 6.800.000
DB Türbin	\$ 12.500.000
Jeneratör	\$ 21.500.000
Toplam	\$ 103.600.000



Grafik 3. Isı Depolu Sisteminin Ekipman Maliyetinin Dağılımı (%)

Çizelge 14. Isı Depolu Sistemde On Yıllık Amortisman Dağılımı

YILLAR	DURAN VARLIĞIN DEĞERİ	AMORTİSMAN	YILLIK AMORTİSMAN	BİRİKMİŞ AMORTİSMAN
2015	75.520.000 USD	0.10	7.552.000 USD	67.968.000 USD
2016	75.520.000 USD	0.10	7.552.000 USD	60.416.000 USD
2017	75.520.000 USD	0.10	7.552.000 USD	52.864.000 USD
2018	75.520.000 USD	0.10	7.552.000 USD	45.312.000 USD
2019	75.520.000 USD	0.10	7.552.000 USD	37.760.000 USD
2020	75.520.000 USD	0.10	7.552.000 USD	30.208.000 USD
2021	75.520.000 USD	0.10	7.552.000 USD	22.656.000 USD
2022	75.520.000 USD	0.10	7.552.000 USD	15.104.000 USD
2023	75.520.000 USD	0.10	7.552.000 USD	7.552.000 USD
2024	75.520.000 USD	0.10	7.552.000 USD	---

Çizelge 15. Isı Depolu Sistemin Toplam Yatırım Maliyetleri

Toplam Yatırım Maliyeti (\$)	
PIC (+5% liste dışı maliyetler)	\$ 108.780.000
PSBC	\$ 20.000.000
Arazi Geliştirme Maliyeti	\$ 7.500.000
Proje ve Yerinde Test Maliyetleri	\$ 5.000.000
Kaverna Geliştirme Maliyeti	\$ 35.000.000
Başlangıç Yedek Parça Maliyeti	\$ 3.500.000
Toplam Direk Maliyetler	\$ 179.780.000
Dolaylı Maliyetler	\$ 15.000.000
Öngörülemeyen Maliyetler (15% TDM)	\$ 26.967.000
Toplam Yatırım Maliyeti	\$ 221.747.000

PIC: Toplam satın alma ve montaj maliyeti

PSBC : Sistem servis maliyeti

Sistemin Ekonomik Analizi

Modelin ekonomik analizi sırasında toplam yatırım maliyetinin yanında işletme sırasındaki maliyet-kazanç oranı ve sistemin geri ödeme süreside ön plana çıkmaktadır.

Bu kapsamda yapılan çalışma modeli basınçlandırma ve üretim olarak iki kısma ayırma ile mümkün olmaktadır.

Basınçlandırma : Günde 10 saat, 4.5 gün

Üretim : Günde 7 saat, 3.5 gün

1 Tam Çevrim : 8 gün

Yılda 40 çevrim ve 320 gün çalışma kabulü ile,

Basınçlandırma:

4.5 gün x 10 saat x 40 çevrim x 34,350 MWe-saat : 61 830 MWe-saat yıllık tüketim

61 830 MWe-saat x 0,20 TL kW-saat : 123 660 000 TL

Üretim:

3.5 gün x 7 saat x 40 çevrim x 104,150 MWe-saat : 102 067 MWe-saat yıllık üretim

102 067 MWe-saat x 0,30 TL kW-saat : 306 201 000 TL

Diğer Giderler:

O.&M. (operasyon bakım onarım)

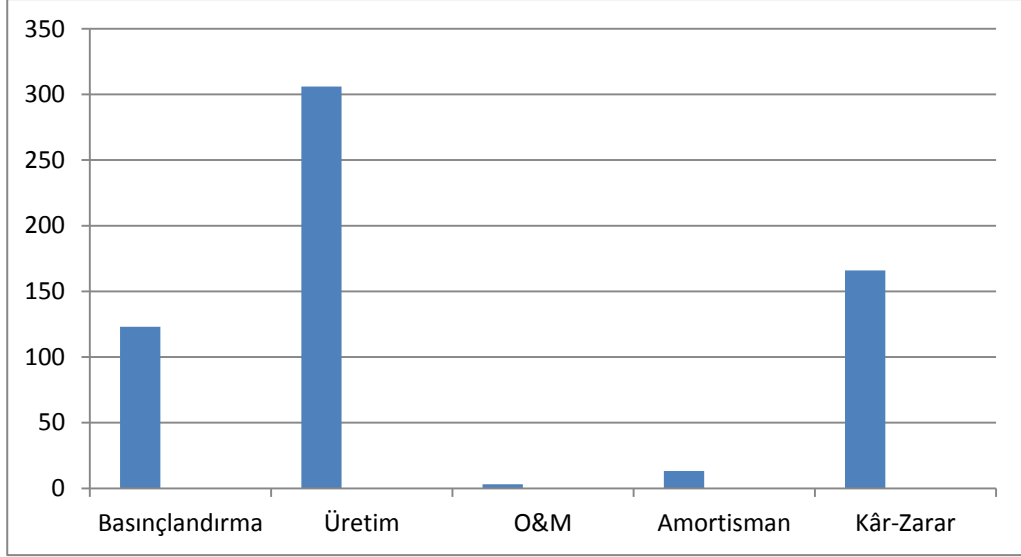
O&M gideri, basınçlandırma maliyetinin % 2,5'i kabulü ile 3 091 500 TL

On yıllık amortisman gideri 75 520 000 USD (1,75 TL kur)

Yıllık Operasyon Kâr/ Zarar Durumu:

Üretim kazancı – basınçlandırma maliyeti – O&M gideri – Amortisman = Kâr / Zarar

306 201 000 TL – 123 660 000 TL – 3 091 500 – 13 216 000 = 166 233 500 TL



Grafik 4. Isı Depolu Sistemin Ekonomik Analiz Gösterimi (Milyon TL)

Yukarıdaki hesaplamalar gece basınçlandırma, gündüz üretim süreçleri kapsamında bir yıllık toplam çevrim sayıları ve gece ile gündüz elektrik kW_h fiyat farkları göz önüne alınarak yapılmıştır. Bu sistemin toplam yatırım maliyet kalemleri, finans, amortisman ve yıllık operasyon kârı değerlendirilmesi sonucunda sistemin kendini yaklaşık 4,6 yılda ödediği ortaya çıkmaktadır. Bu sistem her üç sistem içerisindeki en çevreci sistem olarak ortaya çıkmaktadır. Sistem içerisinde diğer sistemlerde mevcut olan doğal gaz kullanımının olmayışı ve çevrim boyunca ortaya çıkan ısı miktarının en verimli şekilde değerlendiriliyor oluşu Isı Depolu sistemin rüzgar santralleri gibi alternatif enerji kaynakları ile iyi birer kombinasyon oluşturacağı düşünülmektedir.

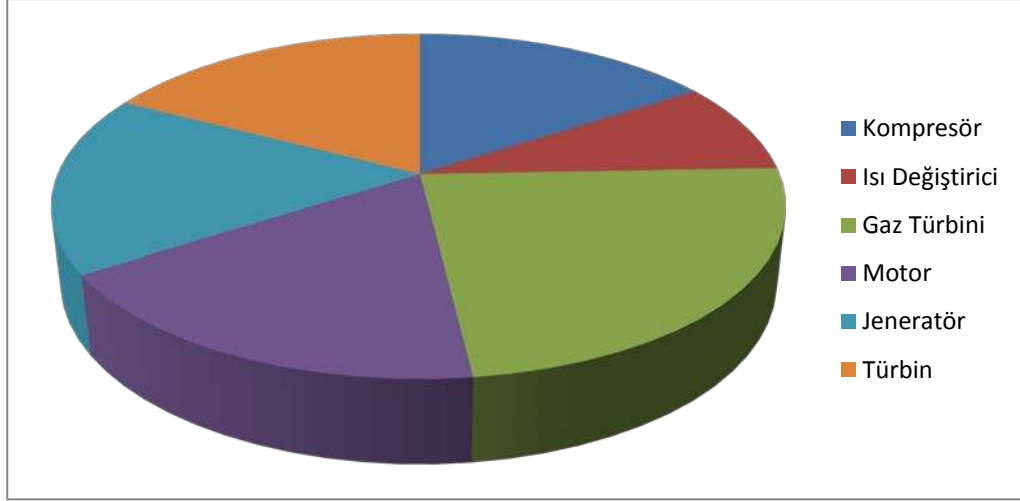
13.3. Gaz Türbini İle Kombine Çalışan Sistemin Ekonomik Analizi

Çizelge 16. Gaz Türbini İle Kombine Çalışan Sistemin Ekipman Maliyetleri
(Bozzolani,2010)

Ekipman	Ortalama Maliyet (\$)
YB Kompresör	\$ 8.800.000
DB Kompresör	\$ 8.500.000
Isı Değiştirici	\$ 9.500.000
GE LM100 Gaz Türbini	\$ 26.000.000
Motor	\$ 19.500.000
YB Türbin	\$ 12.500.000
DB Türbin	\$ 6.500.000
Jeneratör	\$ 18.500.000
Toplam	\$ 109.800.000

Çizelge 17. Gaz Türbini İle Kombine Çalışan Sistemde On Yıllık Amortisman Dağılımı

YILLAR	DURAN VARLIĞIN DEĞERİ	AMORTİSMAN	YILLIK AMORTİSMAN	BİRİKMİŞ AMORTİSMAN
2015	76.860.000 USD	0.10	7.686.000 USD	69.174.000 USD
2016	76.860.000 USD	0.10	7.686.000 USD	61.488.000 USD
2017	76.860.000 USD	0.10	7.686.000 USD	53.802.000 USD
2018	76.860.000 USD	0.10	7.686.000 USD	46.116.000 USD
2019	76.860.000 USD	0.10	7.686.000 USD	38.430.000 USD
2020	76.860.000 USD	0.10	7.686.000 USD	30.744.000 USD
2021	76.860.000 USD	0.10	7.686.000 USD	23.058.000 USD
2022	76.860.000 USD	0.10	7.686.000 USD	15.372.000 USD
2023	76.860.000 USD	0.10	7.686.000 USD	7.686.000 USD
2024	76.860.000 USD	0.10	7.686.000 USD	---



Grafik 5. Gaz Türbini İle Kombine Çalışan Sistemin Ekipman Maliyetinin Dağılımı (%)

Çizelge 18. Gaz Türbini İle Kombine Çalışan Sistemin Toplam Yatırım Maliyetleri

Toplam Yatırım Maliyeti (\$)	
PIC (+5% liste dışı maliyetler)	\$ 115.290.000
PSBC	\$ 20.000.000
Arazi Geliştirme Maliyeti	\$ 7.500.000
Başlangıç Yedek Parça Maliyeti	\$ 3.500.000
Proje ve Yerinde Test Maliyetleri	\$ 5.000.000
Kaverna Geliştirme Maliyeti	\$ 35.000.000
Toplam Direk Maliyetler	\$ 186.290.000
Dolaylı Maliyetler	\$ 14.000.000
Öngörülemeyen Maliyetler (15% TDM)	\$ 27.943.500
Toplam Yatırım Maliyeti	\$ 228.233.500

PIC: Toplam satın alma ve montaj maliyeti

PSBC : Sistem servis maliyeti

Sistemin Ekonomik Analizi,

Modelin ekonomik analizi sırasında toplam yatırım maliyetinin yanında işletme sırasındaki maliyet-kazanç oranı ve sistemin geri ödeme süreside ön plana çıkmaktadır. Bu kapsamda yapılan çalışma modeli basınçlandırma ve üretim olarak iki kısma ayırma ile mümkün olmaktadır.

Basınçlandırma : Günde 14 saat, 6.5 gün

Üretim : Günde 7 saat, 3.5 gün

1 Tam Çevrim : 10 gün

Yılda 32 çevrim ve 320 gün çalışma kabülü ile,

Basınçlandırma:

6.5 gün x 14 saat x 32 çevrim x 16,671 MWe-saat : 48 545 MWe-saat yıllık tüketim

48 545 MWe-saat x 0,20 TL kW-saat : 91 090 000 TL

Üretim:

3.5 gün x 7 saat x 32 çevrim x 51,303 MWe-saat : 40 221 MWe-saat yıllık üretim

40 221 MWe-saat x 0,30 TL kW-saat : 120 663 000 TL

3.5 gün x 7 saat x 32 çevrim x 100 MWe-saat : 78 400 MWe-saat yıllık üretim (gaz türbin)

78 400 MWe-saat x 0,30 TL kW-saat : 235 200 000 TL

Toplam üretim : 355 863 000 TL

Diğer Giderler:

Yakıt gideri + O.&M. (operasyon bakım onarım)

3.5 gün x 3600 sn x 200 kg : 2 520 000 kg tek çevrim x 32 çevrim : 80 640 000 kg/yıl

1 m³ doğal gazın 0,67 kg karşılığında, yıllık tüketim 120 358 208 m³ 'tür.

1000 m³ gazın 400 USD bedeli kabulü ile, yıllık gaz tüketimi 48 143 283 USD (1,75 TL kur)

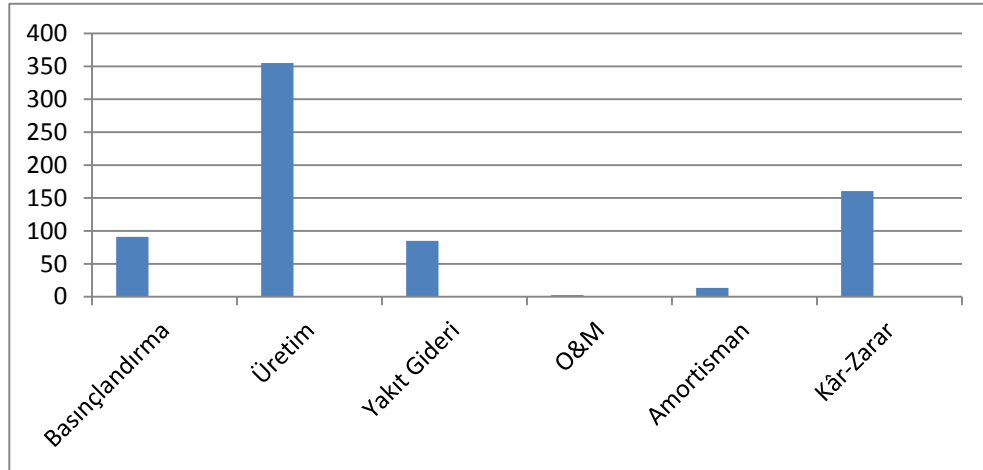
O&M gideri, basınçlandırma maliyetinin % 2,5'i kabulü ile 2 475 200 TL

On yıllık amortisman gideri 76 860 000 USD (1,75 TL kur)

Yıllık Operasyon Kârı:

Üretim kazancı – basınçlandırma maliyeti – yakıt gideri – O&M gideri – Amortisman = Kâr / Zarar

355 863 000 TL – 91 090 000 TL – 84 250 745 TL – 2 475 200 – 13 450 500
= 160 596 555 TL



Grafik 6. Gaz Türbini İle Kombine Çalışan Sistemin Ekonomik Analiz Gösterimi (Milyon TL)

Yukarıdaki hesaplamalar gece basınçlandırma, gündüz üretim süreçleri kapsamında bir yıllık toplam çevrim sayıları ve gece ile gündüz elektrik kW_h fiyat farkları göz önüne alınarak yapılmıştır. Bu sistemin toplam yatırım maliyet kalemleri, finansman, amortisman ve yıllık operasyon kârı değerlendirilmesi sonucunda sistemin kendini yaklaşık 4,9 yılda ödediği ortaya çıkmaktadır.

14. SİSTEMLERİN TERMODİNAMİK ve EKONOMİK KARŞILAŞTIRMASI

Çizelge 19. Sistemlerin Termodinamik Verileri

	Geleneksel			Isı Depolu			Melez (Gaz Türbini)	
	DB	OB	YB	DB	OB	YB	DB	YB
$W_{komp.}$ (kWh)	14849	10682	9145	14849	6404	13097	4027	12644
$W_{türbin}$ (kWh)	82044	-	24690	34599	-	69551	19245	32058
$\eta_{komp.}$	0,89	0,83	0,83	0,89	0,83	0,83	0,89	0,83
$\eta_{türbin}$	0,79	-	0,83	0,79	-	0,83	0,79	0,83
η_{sistem}	% 33			% 39			%34	
$Ex_{komp.}$ (kWh)	4696	19499	1250	7728	6337	12929	17663	2062
$Ex_{türbin}$ (kWh)	21766	-	2470	34292	-	68983	2959	5541
$Ex_{yıkım}$ (kWh)	29881			76281			11225	

Tez çalışması kapsamında yapılmış olan sistem tasarımları termodinamik inceleme boyutunda ele alındığında geleneksel sistemin kompresör ve türbin verimlerinin diğer sistemlerden daha yüksek olduğu ortaya çıkmıştır. Burada en önemli nedenlerin başında ara soğutucuların ve son soğutucunun kullanılarak hava sıcaklığını sistem içersinde en ideal oranda tutulması olarak değerlendirilebilir.

Aşağıdaki ekonomik analiz tablosunda belirtildiği üzere her üç sistem içinde yüksek birer yatırım maliyeti ortaya çıkmaktadır. Ancak elektrik çıktılarının büyüklüğü ve bu çıktıların elektiriğin pahalı olduğu saatlerde devreye alınması geri ödeme sürelerini ciddi bir şekilde aşağı çektiği ortaya çıkmıştır. Bu tür yatırımların genelde yüzde yirmi öz kaynak ve kalan kısmı içinde on yıllık finans destekleri ile yapıldığı göz önüne alındığında geri ödeme sürelerinin sistem başına ortalama 1,5 yıl arttığı görülmektedir.

Çizelge 20. Sistemlerin Ekonomik Analiz Gösterimi

Maliyetler (USD)	Geleneksel	Isı Depolu	Melez (Gaz Türbini)
Satın alma ve montaj	137 025 000	108 780 000	115 290 000
Sistem servis	20 000 000	20 000 000	20 000 000
Arazi geliştirme	7 500 000	7 500 000	7 500 000
Proje ve yerinde test	5 000 000	5 000 000	5 000 000
Kaverna geliştirme	35 000 000	35 000 000	35 000 000
Başlangıç yedek parça	3 500 000	3 500 000	3 500 000
Dolaylı	15 000 000	15 000 000	15 000 000
Öngörülmeven	31 203 750	26 967 000	27 943 500
Toplam yatırım	254 228 750	221 747 000	228 233 500
10 yıllık finansman	162 706 400	141 918 080	146 069 440
10 yıllık amortisman	91 350 000	75 520 000	76 860 000
Geri ödeme süresi	5,5 Yıl	4,6 Yıl	4,9 Yıl

Her iki çizelgede de ortaya konduğu üzere ısı depolu sistem gerek sistem verimi gerekse geri ödeme süresi konusunda en fizibil sistemdir.

15. SİSTEMLERİNİN ÇEVRE İLE ETKİLEŞİMİ ve KARBON ANALİZLERİ

Çizelge 21. Sistemlerinin Çevre Uyumu

Potansiyel Konular		Basınçlı Hava Enerji Depolama
İnsan Etkileri	Nüfus	Düşük
	Trafik	Düşük
	Kültürel Hazine	Düşük
	Sağlık	Düşük
Ekoloji ve Doğal Sistemlere Etkileri	Biyolojik Kirlilik	Düşük
	Balıkçılık	Düşük
	Hava ve İklim	Düşük-Orta
	Yeryüzü Yapıları	Düşük
	Su Kaynakları ve Kalitesi	Düşük
Fiziksel Çevreye Etkileri	Ses Düzeyi	Düşük
	Zemin, Jeoloji ve Çökelti	Düşük
	Hidroloji ve Hidrojeoloji	Düşük

Yukarıdaki çizelgede belirtildiği gibi, basınçlı hava enerji depolama sistemlerinin çevreyle etkileşimi noktasında diğer enerji depolama yöntemlerine göre avantajlı bir konumda bulunması bu tür enerji depolama sistemlerinin değerlendirilmesinde önemlidir.

Genel olarak bu tür sistemlerin insan sağlığı, doğal sistemlere karşı etkileri ve fiziksel çevreyle uyumları gibi potansiyel konular gözönüne alındığında klasik ve gaz türbini ile kombine çalışan sistemlerde yakıt tüketiminden dolayı ortaya çıkan gaz salımlarının dışında doğaya ve insan hayatına etkileri konusunda çevreci oldukları görülmektedir.

Sistemler Arası Karbondioksit Salım Analizi,

Geleneksel Sistem,

Giren Ekserji : 54117 kW_h

Ekserji Yıkımı : 29881 kW_h

Ekserji Yıkım Oranı (A) : Ekserji Yıkımı / Giren Ekserji

(A) : 29881 kW_h / 54117 kW_h = 0,552

Isı Depolu Sistem,

Giren Ekserji : 26994 kW_h

Ekserji Yıkımı : 7715 kW_h

Ekserji Yıkım Oranı (B) : Ekserji Yıkımı / Giren Ekserji

(B) : 7715 kW_h / 26994 kW_h = 0,286

Gaz Türbini İle Kombine Sistem,

Giren Ekserji : 19725 kW_h

Ekserji Yıkımı : 11225 kW_h

Ekserji Yıkım Oranı (C) : Ekserji Yıkımı / Giren Ekserji

(C) : 11225 kW_h / 19725 kW_h = 0,569

- Geleneksel Sistem ile Isı Depolu Sistem Arasındaki Karbondioksit Salım Oranı :

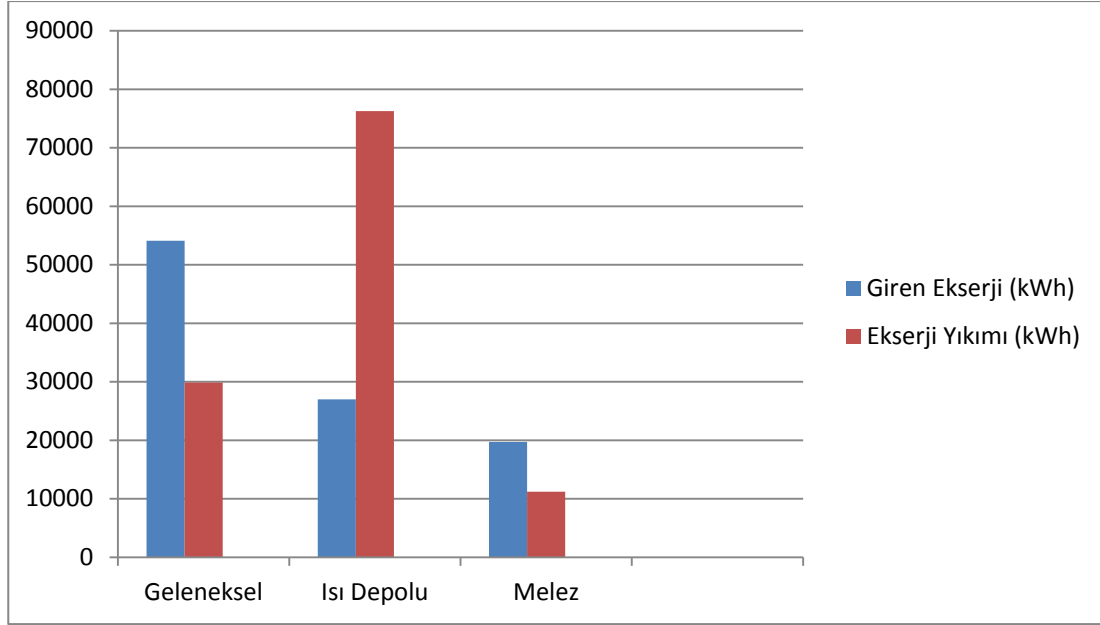
$$(2 - (1 - A)) / (2 - (1 - B)) = (2 - (1 - 0,552)) / (2 - (1 - 0,286)) = 1,207$$

- Geleneksel Sistem ile Gaz Türbini ile Kombine Sistem Arasındaki Karbondioksit Salım Oranı :

$$(2 - (1 - A)) / (2 - (1 - C)) = (2 - (1 - 0,552)) / (2 - (1 - 0,569)) = 0,989$$

- Isı Depolu Sistem ile Gaz Türbini ile Kombine Sistem Arasındaki Karbondioksit Salım Oranı :

$$(2 - (1 - B)) / (2 - (1 - C)) = (2 - (1 - 0,286)) / (2 - (1 - 0,569)) = 0,820$$



Grafik 7. Her Üç Sistemin Giren Ekserji ve Ekserji Yıkımları (kW_h)

Geleneksel Sistemin Isı Depolu Sisteme Göre Karbon Getirisi,

Geleneksel sistemin yıllık tüketimi (kW_h) * İki sistem arası salım oranı * 0,35 kg CO₂/kW_h = 34 677 * 1,207 * 0,35 = 14 649,29 ton CO₂

14 649,29 ton * 25 € = 366 232 € bir yıllık karbon salımı getirisi

Geleneksel Sistemin Gaz Türbini ile Kombine Çalışan Sisteme Göre Karbon Getirisi,

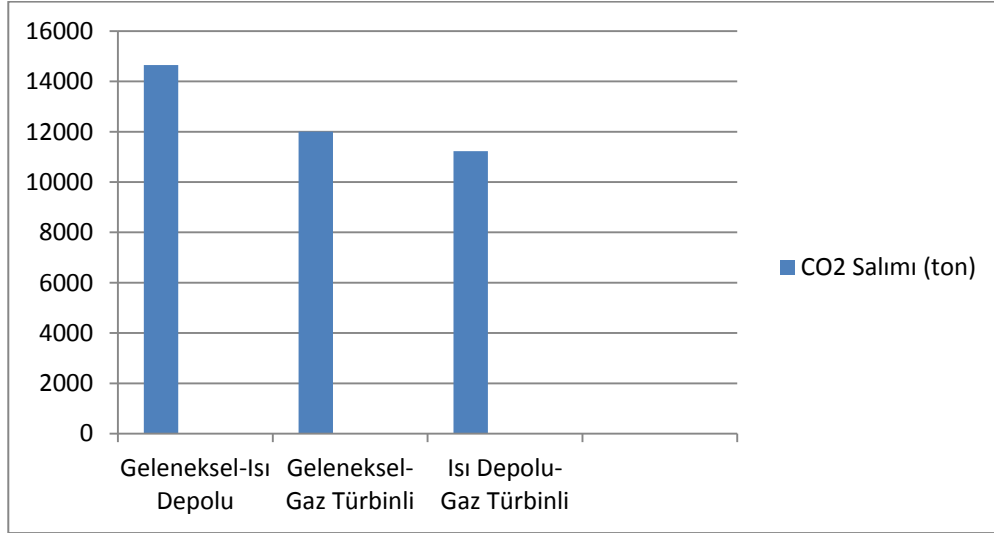
Geleneksel sistemin yıllık tüketimi (kW_h) * İki sistem arası salım oranı * 0,35 kg CO₂/kW_h = 34 677 * 0,989 * 0,35 = 12 003,44 ton CO₂

12 003,44 ton * 25 € = 300 086 € bir yıllık karbon salımı getirisi

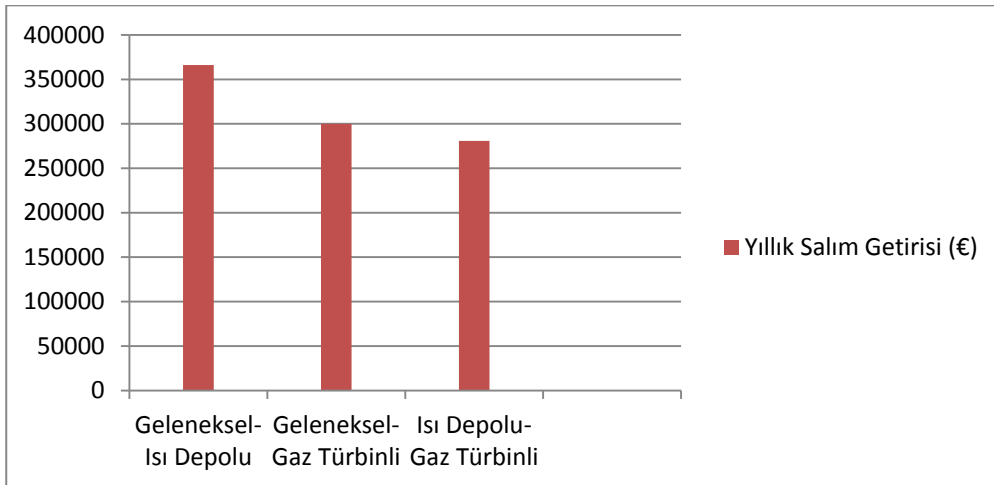
Isı Depolu Sistemin Gaz Türbini ile Kombine Çalışan Sisteme Karbon Getirisi.

Isı depolu sistemin yıllık tüketimi (kW_h) * İki sistem arası salım oranı * 0,35 kg CO_2/kW_h = $39\,128 * 0,820 * 0,35 = 11\,229,74$ ton CO_2

$11\,229,74$ ton * 25 € = 280 743 € bir yıllık karbon salımı getirisi



Grafik 8. Sistemlerin Karbon Salım Karşılaştırmaları



Grafik 9. Sistemlerin Karbon Salım Getiri Karşılaştırmaları

16. SONUÇ

Bu tez çalışmasında enerji depolama sistemlerinin önemi, gerekliliği gibi konulara değinilerek çalışma konusu olan basınçlı hava enerji depolama sistemleri üzerine çeşitli sistemler üzerinde çalışılmıştır.

Bu tez çalışması kapsamında ortaya konan veriler ışığında ülkemizdeki yeraltı depolama imkanları tartışılmış ve örnek sistemler üzerinde ekonomik, teknolojik ve termodinamik çalışmalar yapılmıştır.

Günümüzde artan enerji talebine bağlı olarak, enerjinin kaliteli, sürekli ve ucuz bir şekilde temini için gerekli olan teknolojilerden biri olan basınçlı hava depolama ile ilgili Mersin İli sınırları içerisinde bulunan yeraltı tuz domları üzerinden bir çalışma yapılmıştır. Her üç sistemde de türbinler adyabatik kabul edilmiştir.

Bu çalışma kapsamında üç ayrı basınçlı hava enerji depolama sistemi değerlendirilmiş ve herbiri için termodinamik ve ekonomik analizler yapılmıştır. Bu analizler sonucunda geleneksel basınçlı hava depolama sisteminin geri dönüş süresi bakımından en uzun oluşu, yanma odalarında kullanılan yakıtın ortaya çıkaracağı karbon salımları ve sistemin kendisinin teknolojik bakımdan eski oluşu dikkate alınması gereken hususlardır.

Geleneksel sistem termodinamik hesaplamaları doğrultusunda kompresörlerin verimleri; DB için 0,79, OB için 0,83 ve YB için 0,83, türbinlerin verimlerinde DB için 0,79 ve YB için 0,83 olarak hesaplanmış ve her üç sistem içinde aynı veriler değerlendirilmiştir.

Toplam sistem verimleri çalışması kapsamında ısı depolu sistemin 0,39'luk verim ile 0,33'lük verime sahip geleneksel ve 0,34'lük verime sahip gaz türbinli sisteme göre daha verimli olduğu ortaya konmuştur.

Isı depolu sistemde diğer sistemlerde mevcut olan doğal gaz kullanımının olmayışı ve çevrim boyunca ortaya çıkan ısı miktarının en verimli şekilde değerlendiriliyor oluşu bu sistemin rüzgar santralleri gibi alternatif enerji kaynakları ile iyi birer kombinasyon oluşturacağı düşünülebilir. Çalışma sırasında değerlendirilen sistemler içerisinde yatırımcılar için en fizibil olan sistemin ısı depolu sistem olduğu ortaya konmuştur.

Toplam yatırım maliyetleri, finansman ve amortisman giderleri değerlendirmesi sonucunda sistem verimi olarak en yüksek olan ısı depolu sistemin 4,6 yıllık bir geri ödeme süresi ile en ekonomik sistem olduğu hesaplanmıştır. Ekonomik analiz çalışması kapsamında geleneksel sistemin geri ödeme süresi 5,5 yıl, gaz türbini ile kombine çalışan sisteminde 4,9 yıl olduğu ortaya çıkmaktadır.

Yüksek yakıt tüketimine sahip olan gaz türbini ile kombine çalışan sistem ulaşmış olduğu yüksek enerji çıktısı, basınçlandırmanın yapılmadığı süreler içerisinde dahi direk gaz türbininden enerji eldesi gibi avantajları tez çalışmasının sonuçları olarak değerlendirilmektedir. Ancak tüm bu avantajların yanında tüketmiş olduğu yüksek yakıt miktarından dolayı ortaya çıkaracağı karbon salımında gözardı edilmemelidir.

Ayrıca geleneksel sistemde basınçlandırma sırasında ortaya çıkan 33783 kW'lık ısı enerjisi, türbinlerden çıkan atık ısı ile birlikte kavernadan çıkan basınçlı havanın ısıtılması işlemi için ısı değiştiricide değerlendirilebilmektedir.

Geleneksel ve gaz türbini ile kombine çalışan sistemlerin ısı depolu sisteme göre farklarından bir diğeride türbinlerinden çıkan atık ısılarının ısı değiştiricilerde değerlendiriliyor oluşudur.

Yıllık 40 çevrim esasına göre yapılan hesaplamalarda her üç sisteminde ortalama yıllık 160 milyon TL'lik bir kâr sağladığı ortaya konmuştur.

Ortaya çıkan sonuçlara bağlı olarak ülkemizde ciddi anlamda yeraltı depolama tesisi kurulacak jeolojik yapıların olduğu bilinmekle birlikte, bu tesislerin sayesinde

enerji arz güvenliğinin sağlanmasını, gerek basınçlı hava gerekse hidrokarbon depolama imkanlarının ÷lke ekonomisine sağlayacağı katkılar ř÷phesizdir.

Bu tez kapsamında yapılan çalışmalar doğrultusunda birçok konu irdelenmiş olup farklı sistemlerin karşılaştırılmaları yapılmıştır. Özellikle ısı depolu sistemin daha detaylı çalışılarak sistemin termodinamik ve ekonomik verilerinin değerlendirilebileceği sistemlerin çalışılması önerilmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] Kazimierz Urbanczyk, Solution Mining Salt Deposits Outline of Recent Development Trends, Andrzej Kunstman, Katarzyna, Poborska-Mlynarska, 2002
- [2] Bullough, C., C. Gatzen, Advanced Adiabatic Compressed Air Energy Storage for the Integration of Wind Energy. European Wind Energy Conference London, UK., 2004
- [3] Cheung, K. Y. C., S. T. H. Cheung, Large-Scale Energy Storage Systems. London, Imperial College, 2006
- [4] Crotogino, F. Clarification of Huntorf Operations, J. Neumiller, 2006
- [5] Kilkis, B. Understanding Exergy Aspects of Energy and Carbon Emissions, Seminar 36, Seminar Proceedings on CD, 2009 ASHRAE Annual Meeting, June 20-24, Louisville, KY, 2009
- [6] Crotogino, F., K.-U. Mohmeyer, Huntorf CAES: More than 20 Years of Successful Operation, Orlando, Florida, U.S.A., 2001
- [7] NaturalGas.org. (2004). "Storage of Natural Gas.", from <http://www.naturalgas.org/naturalgas/storage.asp>, Retrieved October 13, 2006
- [8] Paksoy, H. O., Underground Thermal Energy Storage - A Choice for Sustainable Future. Adana, Turkey, Cukurova University, 2005
- [9] Research Reports International, Energy Storage Technologies For Electric Power Applications, 2004
- [10] BAAR, C.A., Applied Salt-Rock Mechanics. I. The in-situ Behavior of Salt Rocks, Amsterdam-Oxford-New York, Elsevier Scientific Publishing Company, 1997
- [11] BUJAKOWSKI, S., Otwory wiernicze przeznaczone do budowy i eksploatacji podziemnych magazynow gazu (PMG) w zlozach soli. Proc. of Symp., Krakow, 1984
- [12] CHARYSZ, W., GARLICKI, A., ZIABKA, Z., Kryteria Rozpoznawania Dokumentowania Zloz Solina Potrzeby Budowy Zbiornikow Podziemnych, Proc. of Symp. Zbiorniki Podziemne Węglowodorow w Zlozach Soli,

- OBRGShem CHEMKOP, Krakow, Wydawnictwa Geologiczne, 1977-1979
- [13] KUNSTMAN, A., S., MAZUR, M., M., Cavern Development and Leaching Simulation, IV. An Introduction to the Technology of Solution Mining, Manuel of SMRI Spring 2000 Tecnical Class. The Hague, The Netherlands, 2000
- [14] KUNTSMAN, A., POBORSKA, K., URBANCZYK, K., Solution Mining In Salt Deposits, Uczelniane wydawnictwa naukowo-dydaktyczne, Krakow, 2007
- [15] Henderson,K., 'Methods of Joining Two or more Well for Brine Production' in Proc. Of Fourth International Symposium on Salt, v.2, Houston, Tex, pp 211-218, 1973
- [16] LORENZ, J., HAAS, JR., J., L., CLYNNE, M., A., POTTER, II, R., W., SCHAFER, C. M., Geology, Mineralogy and Some Geophysical and Geochemical Properties of Salt Deposits. Physical Properties Data For Rock Salt. US National Bureau of Standards, Ed. E.T. Gevantman. 1973
- [17] RICHNER, D.R., SHOCK, D., AHLNESS, J.K., In: Solution Mining: In Situ Techniques. Hartman H.L. (Senior Editor), SME Mining Engineering Handbook, vol 1,2, Society for mining, metallurgy and exploration inc., 1995
- [18] TESTA, S.M., Geological Aspects of Hazardous Waste Management. Boca Raton, Lewis Publishers, 1995
- [19] THOMS, R., L., GEHL, R., M., Feasibility of Controlled Solution Mining From Horizontal Wells. SMRI Fall 1993 Meeting Paper, Lafayette, Louisiana, 1993
- [20] TERNEK, Z, Mersin-Tarsus kuzey bölgesinin jeolojisi: MTA,Ankara, Rapor No:49, 1953
- [21] Doğal gaz depolama amaçlı yeraltı tuz çözelti açıklıklarının farklı işletme koşulları altında duraylılığın incelenmesi - ÖZARSLAN, Ahmet; GENİŞ, Melih; BİLİR, M. Erdinç
- [22] Schnaid, I., Weiner, D., Brokman, S., 'Novel Compressed Air Energy Storage Systems Applying Air Expanders' Presented at the International Gas Turbine and Aeroengine Congress and Exposition, Houston, Texas,

June 5-8, 1995

- [23] Vadasız, P., Pugatsch, Y. and Weiner D.,: 'Compressed Air Energy Storage: Engineering Considerations Using An Optimal Conceptual Design', Miami Beach, Fl. December 14-16, 1987
- [23] Enerji Piyasası Düzenleme Kurulu internet sitesi – www.epdk.gov.tr
- [24] FERC Natural Gas Storage -www.ferc.gov
- [25] Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü internet sitesi - www.mta.gov.tr

EK 1. Havanın İdeal Gaz Özellikleri

TABLE A-17

Ideal-gas properties of air

T K	h kJ/kg	P _r	u kJ/kg	v _r	s ^o kJ/kg · K	T K	h kJ/kg	P _r	u kJ/kg	v _r	s ^o kJ/kg · K
200	199.97	0.3363	142.56	1707.0	1.29555	580	586.04	14.38	419.55	115.7	2.37448
210	209.97	0.3987	149.69	1512.0	1.34444	590	596.52	15.31	427.15	110.6	2.39140
220	219.97	0.4650	156.82	1346.0	1.39105	600	607.02	16.28	434.78	105.8	2.40612
230	230.02	0.5477	164.00	1205.0	1.43557	610	617.53	17.30	442.42	101.2	2.42044
240	240.02	0.6365	171.13	1084.0	1.47824	620	628.07	18.36	450.09	96.92	2.43456
250	250.05	0.7329	178.28	979.0	1.51917	630	638.63	19.44	457.78	92.84	2.44848
260	260.09	0.8405	185.45	887.8	1.55848	640	649.22	20.54	465.50	88.99	2.47176
270	270.11	0.9590	192.60	808.0	1.59634	650	659.84	21.66	473.26	85.34	2.49364
280	280.13	1.0889	199.75	738.0	1.63279	660	670.47	22.81	481.01	81.85	2.50989
285	285.14	1.1584	203.83	708.1	1.65065	670	681.14	24.00	488.81	78.61	2.52589
290	290.16	1.2311	208.91	678.1	1.66802	680	691.82	25.25	496.62	75.50	2.54175
295	295.17	1.3068	210.43	647.9	1.68515	690	702.52	26.59	504.46	72.56	2.55731
298	298.18	1.3543	212.64	631.5	1.69528	700	713.27	28.00	512.33	69.76	2.57277
300	300.19	1.3860	214.07	621.2	1.70203	710	724.04	30.38	520.23	67.07	2.58810
303	303.22	1.4686	217.67	596.0	1.71865	720	734.82	32.02	528.14	64.53	2.60319
310	310.24	1.5546	221.25	572.3	1.73498	730	745.62	33.72	536.07	62.13	2.61802
315	315.27	1.6442	224.80	549.8	1.75106	740	756.44	35.50	544.02	59.82	2.63260
320	320.29	1.7375	228.42	528.6	1.76690	750	767.29	37.35	551.99	57.63	2.64707
325	325.31	1.8345	232.02	508.4	1.78249	760	778.18	39.27	560.01	55.54	2.66178
330	330.34	1.9352	235.61	489.4	1.79783	780	800.03	43.35	576.12	51.64	2.69013
340	340.42	2.145	242.82	454.1	1.82790	800	821.95	47.75	592.30	48.08	2.71787
350	350.49	2.379	250.02	422.2	1.85708	820	843.96	52.59	608.59	44.84	2.74504
360	360.58	2.626	257.24	393.4	1.88543	840	866.08	57.60	624.95	41.85	2.77177
370	370.67	2.892	264.46	367.2	1.91313	860	888.27	63.09	641.40	39.12	2.79783
380	380.77	3.176	271.69	343.4	1.94001	880	910.56	68.98	657.95	36.61	2.82344
390	390.88	3.481	278.93	321.5	1.96633	900	932.93	75.29	674.58	34.31	2.84856
400	400.98	3.806	286.18	301.6	1.99184	920	955.38	82.05	691.28	32.18	2.87324
410	411.12	4.153	293.43	283.3	2.01669	940	977.92	89.28	708.08	30.22	2.89748
420	421.26	4.522	300.69	266.6	2.04142	960	1000.55	97.00	725.02	28.40	2.92128
430	431.43	4.915	307.99	251.1	2.06533	980	1023.25	105.2	741.98	26.75	2.94468
440	441.61	5.332	315.30	236.8	2.08870	1000	1046.04	114.0	758.94	25.17	2.96770
450	451.80	5.775	322.62	223.6	2.11161	1020	1068.89	123.4	776.10	23.72	2.99034
460	462.02	6.245	329.97	211.4	2.13407	1040	1091.85	133.3	793.36	22.39	3.01260
470	472.24	6.742	337.32	200.1	2.15604	1060	1114.85	143.9	810.62	21.14	3.03449
480	482.45	7.268	344.70	189.5	2.17760	1080	1137.89	155.2	827.88	19.98	3.05606
490	492.74	7.824	352.08	179.7	2.19876	1100	1161.07	167.1	845.33	18.896	3.07732
500	503.02	8.411	359.49	170.6	2.21952	1120	1184.28	179.7	862.79	17.886	3.09826
510	513.32	9.031	366.92	162.1	2.23993	1140	1207.57	193.1	880.35	16.946	3.11883
520	523.63	9.684	374.38	154.1	2.25997	1160	1230.92	207.2	897.91	16.064	3.13915
530	533.98	10.37	381.84	146.7	2.27967	1180	1254.34	222.2	915.57	15.241	3.15916
540	544.35	11.10	389.34	139.7	2.29906	1200	1277.79	238.0	933.33	14.470	3.17888
550	555.74	11.86	396.86	133.1	2.31809	1220	1301.31	254.7	951.09	13.747	3.19834
560	565.17	12.66	404.47	127.0	2.33685	1240	1324.93	272.3	968.95	13.069	3.21751
570	575.59	13.50	411.97	121.2	2.35531						

TABLE A-17

Ideal-gas properties of air (Continued)

T K	h kJ/kg	P _r	u kJ/kg	v _r	s ^o kJ/kg · K	T K	h kJ/kg	P _r	u kJ/kg	v _r	s ^o kJ/kg · K
1260	1348.55	290.8	986.90	12.435	3.23639	1600	1757.57	791.2	1298.30	5.804	3.52364
1280	1372.24	310.4	1004.76	11.835	3.25510	1620	1782.00	834.1	1316.96	5.574	3.53879
1300	1396.97	330.9	1022.82	11.275	3.27345	1640	1806.46	878.9	1335.72	5.355	3.55381
1320	1419.76	352.5	1040.88	10.747	3.29160	1660	1830.95	925.6	1354.48	5.147	3.56867
1340	1443.60	375.3	1058.94	10.247	3.30959	1680	1855.50	974.2	1373.24	4.949	3.58335
1360	1467.49	399.1	1077.10	9.780	3.32724	1700	1880.1	1025	1392.7	4.761	3.59794
1380	1491.44	424.2	1095.26	9.337	3.34474	1750	1941.6	1161	1439.8	4.328	3.6336
1400	1515.42	450.5	1113.52	8.919	3.36200	1800	2003.3	1310	1487.2	3.994	3.6684
1420	1539.44	478.0	1131.77	8.526	3.37901	1850	2065.3	1475	1534.9	3.667	3.7023
1440	1563.51	506.9	1150.13	8.153	3.39586	1900	2127.4	1655	1582.6	3.355	3.7354
1460	1587.63	537.1	1168.49	7.801	3.41247	1950	2189.7	1852	1630.6	3.052	3.7677
1480	1611.79	568.8	1186.95	7.468	3.42892	2000	2252.1	2068	1678.7	2.775	3.7994
1500	1635.97	601.9	1205.41	7.152	3.44518	2050	2314.6	2303	1726.8	2.505	3.8303
1520	1660.23	636.5	1223.87	6.854	3.46120	2100	2377.7	2559	1775.3	2.256	3.8605
1540	1684.51	672.8	1242.43	6.569	3.47712	2150	2440.3	2837	1823.8	2.175	3.8901
1560	1708.82	710.5	1260.99	6.301	3.49276	2200	2503.2	3138	1872.4	2.012	3.9191
1580	1733.17	750.0	1279.65	6.046	3.50829	2250	2566.4	3464	1921.3	1.864	3.9474

Note: The properties P_r (relative pressure) and v_r (relative specific volume) are dimensionless quantities used in the analysis of constant-pressure processes, and should not be confused with the properties pressure and specific volume.

Source: Kenneth Wark, *Thermodynamics*, 4th ed. (New York: McGraw-Hill, 1983), pp. 785-86, Table A-5. Originally published in J. H. Keenan and J. Keyes, *Gas Tables* (New York: John Wiley & Sons, 1958).