

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**CHENG ÇEVİRİMİNDE YANMA ODASINA
PÜSKÜRTÜLEN SU BUHARI MİKTARININ ÇEVİRİM
NET GÜCÜNE VE VERİME ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

Makina Mühendisi Semra AKDENİZ

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

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Recep ÖZTÜRK (YTÜ)

İSTANBUL, 2010

İÇİNDEKİLER	sayfa
İÇİNDEKİLER	ii
SİMGE LİSTESİ.....	iv
ŞEKİL LİSTESİ.....	v
ÇİZELGE LİSTESİ	vi
ÖNSÖZ	ix
ÖZET	x
ABSTRACT.....	xi
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR TARAMASI	3
2.1 Cheng Çevriminin Tarihsel Gelişimi	3
2.1.1 1974-1984 Tarihleri Arasındaki İlerlemeler	3
2.1.2 1984-1994 Tarihleri Arasındaki İlerlemeler	4
2.1.3 1994'ten Günümüze Kadar Olan Gelişmeler.....	4
2.2 Buhar Püskürtmeli Gaz Türbinli Sistemler.....	5
3. CHENG ÇEVİRİMİ ÇALIŞMA PRENSİBİ VE KULLANIM ALANLARI.....	8
4. CHENG ÇEVİRİMİNİN TERMODİNAMİK ANALİZİ.....	9
4.1 Termodinamiğin I. Kanunu	9
4.2 Özgül Isılar	10
4.3 Gaz Karışımları	11
4.4 Yanma	12
4.5 Formasyon Entalpisi.....	13
4.6 Kimyasal Reaksiyonlarda Termodinamiğin Birinci Kanunu	13
5. ÖRNEK SİSTEMİN SEÇİMİ VE PERFORMANSININ İNCELENMESİ.....	15
5.1 Örnek Cheng Çevrimi Çalışma prensibi	15
5.2 Sabit Basınç Oranında ve Değişen Su Buharı Püskürtme Miktarlarındaki Cheng Çevrimi Dizayn Parametreleri Seçimi.....	15
5.2.1 Yapılan Kabuller	16
5.2.2 Kompresör	17
5.2.3 Yanma Odası.....	18

5.2.4 Adyabatik Alev Sıcaklığının Hesaplanması	22
5.2.5 Gaz Türbini	25
5.2.6 Çevrim Veriminin Hesaplanması.....	33
5.3 Farklı Basınç Oranlarında ve Sabit Türbin Giriş Sıcaklıklarında Yanma Odasına Değişen Miktarlarda Su Buharı Püskürtülmesinin Çevrim Performansına Etkisinin İncelenmesi ...	36
5.3.1 Çevrim Parametreleri Seçimi.....	36
5.3.2 Yapılan Kabuller	36
5.3.3 Kompresör Çıkış Sıcaklığının ve Kompresör Gücünün Bulunması	37
5.3.4 Türbin Giriş Entalpisi ve Yakıt Miktarlarının Bulunması	38
5.3.5 Yanma Sonu Ürünlerinin Mol Kütlelerinin ve Kütleli Debilerinin Bulunması	40
5.3.6 Türbin Giriş Entalpilerinin Bulunması	43
5.3.7 Gaz Türbini Çıkış Sıcaklığının Bulunması	45
5.3.8 Isı Değiştiricisinde Üretilen Buhar Miktarının Bulunması.....	48
5.3.9 Çevrimin Net Gücünün Hesaplanması	51
5.3.10 Çevrim Veriminin Bulunması.....	56
SONUÇ	63
KAYNAKLAR	65
ÖZGEÇMİŞ	65

SİMGE LİSTESİ \bar{c}_p = sabit basınçta özgül ısı, kJ/kmol

E= Toplam enerji

h, \bar{h} = Özgül entalpi, kJ/kg veya kJ/kmol \bar{h}_f^0 = Oluşum entalpisi, kJ/kmol \dot{m} = kütleli debi, kg/s

M = mol kütlesi, kg/mol

n = mol miktarı, kmol

 η_m = mekanik verim η_{cis} = kompresör izentropik verimi η_{tis} = türbin izentropik verimi η_{cp} = kompresör politropik verimi η_{tp} = türbin politropik verimi η_I = Enerji verimi

P = Basınç, bar

Q= Birim kütle için ısı geçişi, kJ/kg

 ϕ = Bağıl nem \bar{R} =Üniversal gaz sabiti, kJ/kmol-K

T = Sıcaklık, °C veya K

U = Toplam iç enerji, kJ

 \dot{W} = Güç, birim zamanda yapılan iş, Kw

W= Birim kütle için iş, kJ/kg

 y_i = sınırlandırılmış ölü durumdaki i maddesinin mol kesri y_n = mol oranı

0 = çevre hali, ölü hal

1 = başlangıç veya giriş hali

2 = son hal veya çıkış hali

BY = Buhar yakıt oranı

bh = havadaki su buharı

be = yanma odasına enjekte edilen buhar

 \dot{c} = çıkış

g = giriş

HY = hava yakıt oranı

h = hava

i = i maddesi

k = kinetik

K=komp = kompresör

KH = Kontrol hacmi

kar = Karışım

LHV = Alt ısı değeri

REJ=Rejeneratör

T=tür = Türbin

y = Yakıt

YİG = Yanma işlemine girenler

YİÇ = Yanma işleminden çıkanlar

ysü = yanma sonu ürünleri

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 5.1	Örnek bir Cheng Çevrimi sisteminin genel şeması	16
Şekil 5.2	Brayton çevrimi T-s diyagramı.....	17
Şekil 5.3	Yakıt olarak doğalgaz kullanılan Cheng Çevriminde yanma odasına değişen miktarlarda buhar püskürtülmesi durumlarında yanma sonu karışım ürünlerinin özgül ısı değerlerinin sıcaklıkla değişimi	28
Şekil 5.4	Eşanjörde ısı transfer diyagramı	31
Şekil 5.5	Sabit Pr oranında yanma odasına püskürtülen buharın miktarlarına göre çevrim net gücü değerleri.....	32
Şekil 5.6	Yanma odasına püskürtülen su buharı miktarlarının değişimine göre çevrim verimi	35
Şekil 5.7	Isı eşanjörü buharlaşma eğrisi.....	48
Şekil 5.8	$T_3=1100$ K için farklı basınç oranlarında değişen buhar püskürtme miktarları için net güç değerleri, W_{net} (kW).....	52
Şekil 5.9	$T_3=1300$ K için farklı basınç oranlarında değişen buhar püskürtme miktarları için net güç değerleri, W_{net} (kW).....	54
Şekil 5.10	$T_3=1400$ K için farklı basınç oranlarında değişen buhar püskürtme miktarları için net güç değerleri, W_{net} (kW).....	55
Şekil 5.11	$T_3=1100$ K için farklı basınç oranlarında değişen buhar püskürtme miktarları için verim değerleri	59
Şekil 5.12	$T_3=1300$ K için farklı basınç oranlarında değişen buhar püskürtme miktarları için verim değerleri	60
Şekil 5.13	$T_3=1400$ K için farklı basınç oranlarında değişen buhar püskürtme miktarları için verim değerleri	61

ÇİZELGE LİSTESİ

Çizelge 4.1	Bazı mükemmel gazların sabit basınçta özgül ısı denklemleri (Öztürk ve Kılıç, (1998)).....	11
Çizelge 5.1	Cheng çevrimi için seçilen çalışma parametreleri	15
Çizelge 5.2	Değişen buhar miktarları için su buharı mol değerleri	20
Çizelge 5.3	Değişen su buharı debisi için yanma elementleri mol değerleri (n_i).....	21
Çizelge 5.4	Yanma sonu ürünlerinin toplam mol miktarları ve yanma sonu ürünlerini oluşturan karışanların mol oranları ($Y_{n,i}$).....	22
Çizelge 5.5	Yanma işlemine giren maddelerin ve yanma sonu ürünlerinin oluşum ve duyulur entalpileri (Öztürk ve Kılıç, (1998)).....	23
Çizelge 5.6	Enjekte edilen su buharı miktarlarına göre yanma işlemine giren maddelerin toplam enerjisi	24
Çizelge 5.7	Enjekte edilen su buharı miktarları için adyabatik alev sıcaklığı (T_3) değerleri.....	25
Çizelge 5.8	Türbin çıkış sıcaklıkları (T_4)	26
Çizelge 5.9	Yanma ürünlerinin mol kütleleri M_i	26
Çizelge 5.10	Enjekte edilen su buharı miktarları için özgül ısı değerleri	27
Çizelge 5.11	Türbin girişinde (h_3) ve çıkışında (h_4) egzoz gazı entalpi değerleri.....	27
Çizelge 5.12	Enjekte edilen buhar miktarına göre türbin gücünün değerleri.....	29
Çizelge 5.13	Değişen buhar miktarlarına göre çevrim net gücü değerleri	30
Çizelge 5.14	Değişen buhar miktarlarına göre egzoz gazlarıyla üretilebilen buhar miktarları	32
Çizelge 5.15	Yakıtı meydana getiren bileşenlerin ısı değerleri ve mol oranları (Moran ve Shapiro,2000).....	33
Çizelge 5.16	Değişen su buharı miktarlarına göre çevrim verimi.....	35
Çizelge 5.17	Sabit türbin giriş sıcaklıklarında Cheng çevrimi için seçilen çalışma parametreleri	36
Çizelge 5.18	Basınç oranlarına bağlı olarak türbin ve kompresör izentropik verim değerleri.....	37
Çizelge 5.19	Farklı basınç oranları için kompresör çıkış sıcaklıkları ve kompresör güçleri.....	38
Çizelge 5.20	$T_3=1100$ K için değişen mbe miktarları ve Pr oranlarına göre yanma odasına gönderilen yakıt miktarları (m_{y_f})(kg/s)	39

Çizelge 5.21	$T_3=1300$ K için değişen mbe miktarları ve Pr oranlarına göre yanma odasına gönderilen yakıt miktarları (m_y)(kg/s)	40
Çizelge 5.22	$T_3=1400$ K için değişen mbe miktarları ve Pr oranlarına göre yanma odasına gönderilen yakıt miktarları (m_y)(kg/s)	40
Çizelge5.23	$T_3=1100$ K için değişen basınç oranları ve buhar miktarları için yanma odasından çıkan karışım miktarları, m_{ys} (kg/s)	41
Çizelge5.24	$T_3=1300$ K için değişen basınç oranları ve buhar miktarları için yanma odasından çıkan karışım miktarları, m_{ys} (kg/s)	41
Çizelge5.25	$T_3=1400$ K için değişen basınç oranları ve buhar miktarları için yanma odasından çıkan karışım miktarları, m_{ys} (kg/s)	42
Çizelge 5.26	$T_3=1100$ K için değişen basınç oranları ve buhar miktarları için yanma odasından çıkan karışımın mol kütlesi, M_{ys} (kg/kmol).....	42
Çizelge 5.27	$T_3=1300$ K için değişen basınç oranları ve buhar miktarları için yanma odasından çıkan karışımın mol kütlesi, M_{ys} (kg/kmol).....	43
Çizelge 5.28	$T_3=1400$ K için değişen basınç oranları ve buhar miktarları için yanma odasından çıkan karışımın mol kütlesi, M_{ys} (kg/kmol).....	43
Çizelge 5.29	$T_3=1100$ K için değişen mbe miktarları ve Pr oranlarına göre yanma odasından çıkan karışımın entalpi değerleri h_3	44
Çizelge 5.30	$T_3=1300$ K için değişen mbe miktarları ve Pr oranlarına göre yanma odasından çıkan karışımın entalpi değerleri h_3	44
Çizelge 5.31	$T_3=1400$ K için değişen mbe miktarları ve Pr oranlarına göre yanma odasından çıkan karışımın entalpi değerleri h_3	45
Çizelge 5.32	Türbin basınç oranları	46
Çizelge 5.33	$T_3=1100, 1300$ ve 1400 K türbin giriş sıcaklıklarında ve değişen basınç oranları için türbin çıkış sıcaklıkları $T_4(K)$	46
Çizelge 5.34	$T_3=1100$ K için değişen basınç oranları ve buhar miktarları için türbin çıkış entalpi değerleri, h_4 (kj/kmol).....	47
Çizelge 5.35	$T_3=1300$ K için farklı basınç oranlarında değişen buhar püskürtme miktarları için türbin çıkış entalpi değerleri, h_4	47
Çizelge 5.36	$T_3=1400$ K için farklı basınç oranlarında değişen buhar püskürtme miktarları için türbin çıkış entalpi değerleri, h_4 (kj/kmol)	48
Çizelge 5.37	$T_3=1400$ K için değişen basınç oranlarında ve farklı buhar püskürtme oranlarındaki çevrimlerin üretebildikleri m_{buhar} değerleri	49

Çizelge 5.38	$T_3=1300$ K için değişen basınç oranlarında ve farklı buhar püskürtme oranlarındaki çevrimlerin üretebildikleri m_{buhar} değerleri.....	50
Çizelge 5.39	$T_3=1100$ K için değişen basınç oranlarında ve farklı buhar püskürtme oranlarındaki çevrimlerin üretebildikleri m_{buhar} değerleri.....	50
Çizelge 5.40	$T_3=1100$ K için farklı basınç oranlarında değişen buhar püskürtme miktarları için türbin gücü değerleri, $W_{türbin}$ (kW)	51
Çizelge 5.41	$T_3=1100$ K için farklı basınç oranlarında değişen buhar püskürtme miktarları için net güç değerleri, W_{net} (kW).....	52
Çizelge 5.42	$T_3=1300$ K için farklı basınç oranlarında değişen buhar püskürtme miktarları için türbin gücü değerleri, $W_{türbin}$ (kW)	53
Çizelge 5.43	$T_3=1300$ K için farklı basınç oranlarında değişen buhar püskürtme miktarları için net güç değerleri, W_{net} (kW).....	53
Çizelge 5.44	$T_3=1400$ K için farklı basınç oranlarında değişen buhar püskürtme miktarları için türbin gücü değerleri, $W_{türbin}$ (kW)	54
Çizelge5.45	$T_3=1400$ K için farklı basınç oranlarında değişen buhar püskürtme miktarları için net güç değerleri, W_{net} (kW).....	55
Çizelge 5.46	$T_3 =1100, 1300$ ve 1400 K türbin giriş sıcaklıklarındaki rejeneratörlü çevrim için yanma odasına gidecek havanın rejeneratörden çıkış sıcaklıkları	57
Çizelge 5.47	$T_3 =1100, 1300$ ve 1400 K türbin giriş sıcaklıklarındaki rejeneratörlü çevrim için yanma odasına gidecek havanın rejeneratörden çıkış entalpileri	57
Çizelge 5.48	$T_3 =1100, 1300$ ve 1400 K türbin giriş sıcaklıklarındaki rejeneratörlü çevrimlerde yanma ürünlerinin rejeneratörde verdiği ısı enerjileri.....	58
Çizelge 5.49	$T_3=1100$ K için farklı basınç oranlarında değişen buhar püskürtme miktarları için verim değerleri	58
Çizelge 5.50	$T_3=1300$ K için farklı basınç oranlarında değişen buhar püskürtme miktarları için verim değerleri	59
Çizelge 5.51	$T_3=1400$ K için farklı basınç oranlarında değişen buhar püskürtme miktarları için verim değerleri	61

ÖNSÖZ

Bu çalışma, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü'ne bağlı Makine Mühendisliği Anabilim Dalı Enerji Programı'nda hazırlanan Yüksek Lisans Tezidir. Çalışmanın kapsamı, gaz türbinlerinde türbinden çıkan atık gazların ısıyla üretilen buharın yanma odasına püskürtülmesi olarak bilinen Cheng Çevrimi'nde buhar miktarının değişmesiyle çevrimin gücünün ve veriminin değişiminin incelenmesidir. Cheng Çevrimi performans değerleri, basit gaz türbini çevrimin değerleri ve reküperatörlü çevrimin değerleri ile karşılaştırılmıştır. Daha sonra sabit türbin giriş sıcaklık değerleri için değişen basınç oranlarında ve değişen buhar miktarlarında Cheng Çevrimi performans değerleri incelenmiştir ve basit gaz türbini çevrimi ve reküperatörlü çevrim performans değerleri ile karşılaştırılmıştır.

Çalışmalarım sırasında yardım ve önerilerini esirgemeyen Prof. Dr. Recep ÖZTÜRK hocama teşekkürlerimi sunarım.

ÖZET

Gaz akışkanlı güç çevrimlerinin performansları kompresör ve türbin güçleriyle doğru orantılıdır. Dolayısıyla performansı arttırmak için kompresör gücünü azaltırken, türbin gücünü arttırmak gerekmektedir. Türbin gücü ise yanma odasına su buharı enjeksiyonu yapılarak artırılabilir.

Bu çalışmada, egzoz gazlarının ısısından yararlanılarak yanma odasına buharın püskürtüldüğü gaz türbini çevrimi olan Cheng Çevriminin performansı incelenmiştir. Çevrimin basınç oranı, türbin giriş sıcaklığı ve püskürtülen yakıt miktarları gibi parametrelerin, örnek Cheng Çevriminin ısı verimi ve net gücü üzerine etkileri analiz edilmiştir. Artan buhar püskürtme miktarlarında ısı verim ve net güç değerlerinde iyileşmeler görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Cheng çevrimi, buhar enjeksiyonu, gaz türbini, performans, verim, performans iyileştirme.

ABSTRACT

The performance of gas power cycles are directly proportional to the power of compressor and turbine. So, in order to degrade the performance, as decreasing the power of compressor, the power of turbine must be increasing. The power of turbine can be made by steam injection to combustion chamber.

In this study, performance evaluation for a model gas turbine applicated to steam injection called Cheng Cycle has been made. The effects of such parameters; turbine inlet temperature, cycle pressure ratio and injected steam amount on thermal efficiency and net power were analyzed. By increasing steam ratio, values of net power and thermal efficiency has been seen improved.

Key Words: Cheng Cycle, steam injection, gas turbine, perofrmance, thermal efficiency, performance improvement.

1. GİRİŞ

Cheng çevriminin çalışma prensibi anlatılacak ve daha sonra çevrimin termodinamik analizi yapılacaktır.

Basit gaz türbini ve basit rejeneratörlü gaz türbini çevriminde belirlenmiş değerler için (kompresör giriş sıcaklığı, kompresör giriş basıncı, hava debisi, yakıt miktarı, sabit basınç oranı ($Pr=10$), yakıtın mol bileşimi, bağıl nem vs.) çevrimin net gücü ve verimi hesaplanacaktır.

Yukarıdaki belirlenmiş değerlere ek olarak yanma odasına değişen miktarlarda (0 kg/s- 2,5 -5- 7,5- 10- 12,5- 15,5- 17,5- 20- 22,5 kg/s) ve 500 K sıcaklık değerindeki buharın (türbinden çıkan atık gazlar tarafından ısı eşanjöründe üretilen) püskürtülmesi yöntemiyle çalışan Cheng çevrimi için net güç ve verim değerleri hesaplanacaktır.

Bu hesaplamalar yapılırken (daha önce yapılan termodinamik analize uygun olarak) buhar miktarının değişik püskürtülmesi sonucu yanma elementlerinin de mol oranları değiştiğinden püskürtülen her bir farklı buhar miktarı için yanma denkleminden yola çıkarak (kinetik ve potansiyel enerji değişimleri ihmal edildiği zaman, kimyasal reaksiyonun olduğu sürekli akışlı açık bir sistemde enerjinin korunumu bağıntısı denkleminin düzenlenmesiyle) çevrim Adyabatik Alev Sıcaklığı olan Türbin Giriş Sıcaklıkları, yanma sonrası entalpi değerleri, türbin çıkış entalpi değerleri, yanma sonu ürünlerinin kütleli debileri ve mol kütleleri her bir buhar püskürtme miktarı için ayrı ayrı hesaplanarak türbin gücü, net güç ve verim değerleri bulunacak ve değerler grafikler halinde gösterilecektir.

Buhar miktarının değeri sıfır alınarak basit gaz türbini çevrim ve rejeneratörlü çevrim performans değerleri hesaplanacak ve Cheng Çevrimiyle karşılaştırılacaktır. Daha sonra Cheng Çevriminde, basit gaz türbini ve rejeneratörlü çevrimde farklı basınç oranlarında ve sabit türbin giriş sıcaklıklarında yanma odasına püskürtülen su buharı miktarının değişiminin çevrim net gücüne ve verimine etkisinin incelemesi yapılacaktır. Bunun için yine bazı değerler belirlenerek kabul edilecektir (kompresör giriş sıcaklığı, kompresör giriş basıncı, hava debisi, yakıtın mol bileşimi, bağıl nem, püskürtülen buharın sıcaklığı, basıncı, basınç oranları sırayla $Pr= 8, 10, 12, 14, 16, 18, 20, 22, 24$ olarak seçildi, türbin giriş sıcaklığının sabit 1100 K, 1300 K ve 1400 K olduğu kabul edildi ve her bir basınç oranı için farklı miktarlarda su buharı olarak 0 - 2,5- 7,5- 10 ve 15,5 kg/s değerleri seçilerek her bir basınç oranı için ve her bir basınç oranındaki farklı püskürtülen buhar miktarları için yanma odasına püskürtülen yakıt miktarları ayrı ayrı hesaplandı).

Değişen yakıt miktarı, su buharı ve basınç oranları için türbin girişi ve çıkışı entalpi değerleri hesaplanacak ve yanma sonu ürünleri debileri de bulunarak net güç ve verim değerleri hesaplanacaktır.

Buhar miktarının sıfır değeri için basit gaz türbini çevrimi ve rejeneratörlü çevrim performans değerleri hesaplanıp ve Cheng çevrimiyle karşılaştırılacaktır.

2. LİTERATÜR TARAMASI

2.1 Cheng Çevriminin Tarihsel Gelişimi

Proseslerin değişen elektrik ve ısı enerjisi ihtiyaçları buhar püskürtmeli gaz türbinli sistemlerin gelişmesine olanak sağlamıştır ve kojenerasyon sisteminin ısı-güç oranı standart sistemlerde çok dar bir aralıkta değiştirilebilirken buhar püskürtmeli gaz türbinlerinde bu oran geniş bir aralıkta, prosesin mevsimlik değişken ısı ve güç ihtiyacına uygun olarak değiştirilebilmektedir (Rice,1995)

Buhar püskürtmeli gaz türbinlerinin ilk uygulamaları 1950'li yıllarda kızgın buharın yanma odasına direkt olarak püskürtülmesi şeklinde, 1960'lı yıllarda bu uygulama buharın hava ile birlikte kompresör çıkışında karıştırılarak yanma odasına gönderilmesi şeklinde olmuştur. Günümüzde buhar yanma odasına, NOx bileşiklerinin emisyonlarını minimum seviyeye indirecek şekilde, yakıt ile birlikte püskürtülmektedir. Buna rağmen kompresör çıkışına buharın püskürtülmesi ile ilgili çalışmalar halen devam etmektedir (Aronis ve Leithner, 2002)

2.1.1 1974-1984 Tarihleri Arasındaki İlerlemeler

1970'ler boyunca petrol ambargosu US'de ilk enerji sıkıntısını yaratmıştı. US enerji politikası aniden enerji dönüşümüne odaklanmıştı. Aynı zamanda asit yağmurlarına bağlı çevresel duyarlılık da termik santrallere sınırlama getirmişti. Nükleer güce bağlılık iyi görünürken Three Mile Island olayı bu seçeneği rafa kaldırmıştır. Gaz türbini bazlı kombine çevrimlerin gelişimi endüstriyel ve yönetimin odak noktası haline geldi. Bu o kadar moda oldu ki %20'den daha az verime sahip 800 kW küçük bir Solar Saturn gaz türbininin bile kombine çevrim versiyonu vardı. Fakat kombine çevrim buhar çevriminin kompleksliğine sahipti. Kombine çevrim iyi tam güç üretmesine rağmen kısmi yüklerde bekleneni veremiyordu. Buhar çevriminin yavaş ilk çalışmaya başlaması da gemilerin hareketi için sorundu. Cheng çevriminin gelişimi, yeni bir türbin çevriminin ticarileşmesi imkanını yakaladı böylece. (Nelson ve Cheng, 2002)

Düşüncede kolay olmasına rağmen gerçek bir Cheng çevrimini yapmak zordu. İlk iş olarak çevrim parametreleri ve kullanıcıların ihtiyaçlarına uygun olarak motor fonksiyonlarını ayarlayacak yazılım karakteristikleri belirlendi. Bu parametreler şunlardı: Hızlı ilk çalışmaya geçme, yüksek kısmi yük verimi, yük değişimlerine hızlı cevap verebilme, temiz emisyon, düşük maliyet, kolay işletim, hızlı durma ve tekrar çalışma. (Nelson ve Cheng, 2002)

1978'de pik verim noktası bir Solar T50 gaz türbininin deneysel olarak kullanılmasıyla belirlendi (Cheng çevrimi, en fazla verimin elde edildiği 'pik verim noktası' nı sağlayan bir

buhar-hava oranı ile çalışır. Pik verim noktası Dr. Urbach (US Navy's David Taylor Research Center,1994) tarafından Cheng noktası olarak adlandırılmıştır. Cheng çevrimi mekanik olarak basit ve çalışma olarak da esnekti. Kombine çevrimden daha hızlı bir şekilde güç ortaya koyan ve emisyon bakımından daha temizdi. (Nelson ve Cheng, 2002)

Allison 501KB türbini ilk ticari platform olarak seçildi. İlk ticari Cheng çevrimi San Jose Üniversitesi kampüsünde elektrik, buhar, ısıtma ve soğutma ihtiyaçlarının karşılanması amacıyla yapıldı. Allison 501 Cheng çevrimi dünyada bir çok ülkede kuruldu. Kaliforniya'da on ünite kuruldu. Bunun üzerine Japonlar da Kawasaki M001ACC türbinini Cheng çevrimine uyguladılar ve gücünün 1.5 kw'dan 2.3 kw'a çıktığı görüldü. Bu çevrim ilk lisanslı Cheng çevrimi oldu. (Nelson ve Cheng, 2002)

2.1.2 1984-1994 Tarihleri Arasındaki İlerlemeler

LM2500: General Electric buhar püskürtmeli LM2500 ve LM5000'i ortaya çıkardı. General elektrik (GE) firması kendi buhar püskürtmeli gaz türbini makinalarına STIG (Steam Injected Gas Turbine- Buhar Enjeksiyonlu Gaz Türbini) adını verdi. (Nelson ve Cheng, 2002)

2.1.3 1994'ten Günümüze Kadar Olan Gelişmeler

Buhar püskürtmeli sistemlerde kullanılan gaz türbinleri dünyaca ünlü Allison ve General Electric firmaları tarafından üretilmektedir. Bu firmalara ait ürünlerin karakteristikleri ile ilgili detaylı bir karşılaştırma yapılmıştır (Bolland ve Stadaas, 1995). Bununla birlikte, bu tür sistemlerin teknolojisi, tercih sebepleri, uygulama alanları, karşılaştırılmaları ve her üretici firmanın kendi ürünleri ile ilgili yayınladığı yayınlar da mevcuttur (Larson ve Williams, 1995), (International Power Technology, 1989).

Kawasaki L20, GE frame 6FA, Westinghouse 501F ve GE frame 7H gibi birçok yeni gaz türbinlerini araştırmak için çalışmalar yapıldı. Cheng çevrimi 25 yıldan fazla ticari marketlerde bulunmaya devam etmektedir (Urbach,1994; Saad, 1992; Saad ve Cheng, 1997). Bunun nedeni olarak Cheng çevriminin kanıtlanmış güvenilirliği, düşük emisyon, kolay işletim ve kombine çevrim performansına yakın olup basit çevrimin maliyetine yakın oluşu sıralanabilir. Ancak çevrim için doğru parametrelerin (sıkıştırma oranı, türbin giriş sıcaklığı vb.) seçilmiş olması gerekir. (Nelson ve Cheng, 2002)

2.2 Buhar Püskürtmeli Gaz Türbinli Sistemler

Buhar püskürtmeli gaz türbinlerinin termodinamik analizi Fraize ve Kinney (1979), Brown ve Cohn (1981), Larson ve Williams (1987), Noymer ve Wilson (1993), ve Rice (1993) gibi birçok araştırmacı tarafından incelenmiş, termodinamik analizin yanı sıra işletme ve optimizasyon analizi Maher (1987), Baken (1988) ve Ito (1995) tarafından yapılmıştır.

Larson ve Williams (1987) gaz türbinli kojenerasyon tesisinde yanma odasına buhar enjekte edilmesiyle sistemin elektrik üretiminde artış meydana geldiğini, buna karşılık ekserji veriminde azalma meydana geldiğini göstermişlerdir.

Rice (1995), proseslerin değişen elektrik ve ısı enerjisi ihtiyaçlarının buhar püskürtmeli gaz türbinli sistemlerin gelişmesine olanak sağladığını ve kojenerasyon sisteminin ısı-güç oranının standart sistemlerde çok dar bir aralıkta değiştirilebilirken buhar püskürtmeli gaz türbinlerinde bu oranın geniş bir aralıkta, prosesin mevsimlik değişken ısı ve güç ihtiyacına uygun olarak değiştirilebildiğini belirtmiştir.

Rice (1995) Brayton ve ara ısıtmalı Brayton çevrimlerine göre çalışan gaz türbinlerinde, değişik türbin rotor sıcaklıkları için yanma odasına enjekte edilen su buharının gaz türbini basınç oranına göre değişimini grafikler halinde vermiştir.

Penning ve De Lange (1996) yaptıkları çalışmada birleşik ısı güç üretim sistemlerinde yanma odasına su buharı enjekte edilmesiyle gaz türbininden elde edilen güçte bir artış meydana geldiğini, fakat yanma odasına su buharı enjekte edilmesiyle toplam buhar üretiminde bir azalma meydana geldiğini bunun da sistemin toplam veriminde bir azalma meydana getirdiğini ileri sürmüşlerdir.

Oh et al. (1996), gaz türbinli kojenerasyon sisteminde kompresör giriş sıcaklığının, bağıl nemin, yanma odasına enjekte edilen su veya buharın sistem verimine etkisini incelemişlerdir. Yine bu çalışmada yanma odasına buhar enjekte edilmesiyle NO_x oluşumunda azalma meydana geldiğini göstermişlerdir.

Fiaschi ve Manfrida (1998) gaz türbinli kojenerasyon sisteminde yanma odasına enjekte edilen su miktarına ve basınç oranına bağlı olarak sistemdeki elemanlarda meydana gelen ekserji kayıplarını ve ekserji verimindeki değişimi araştırmışlardır. Sisteme su enjekte edilmesiyle sistemin veriminde azalma meydana geldiğini göstermişlerdir.

Heppenstall (1998), buhar püskürtmeli gaz türbini de dahil çeşitli çevrimlerin ekonomik ve termodinamik karakteristiklerini incelemiştir. Buhar püskürtmeli sistemde yanma odasına gönderilen buharın basıncının kompresör çıkış basıncından az olamayacağını belirtmiştir. 30

MW güç üreten %36 termik verimine sahip GE LM5000 gaz türbininin buhar püskürtme ile gücü 42 MW'a çıktığı ve veriminin de yaklaşık % 6 arttığını belirtmiştir. Buhar püskürtmeli sistemde su tüketiminin maliyet açısından etkili olduğunu belirtmiştir. Su tüketiminin bir kWh elektrik için 1,1 ve 1,6 kg aralığında olduğunu belirtmiştir. Cheng çevriminin ticari uygulamalarının hepsinin 10 MW 'dan daha düşük güç üreten düşük kapasitelerde olduğu belirtilmiştir.

De Paepe ve Dick (2001), termodinamik çevrim modellemesi ile buhar püskürtmeli gaz türbininin özgül gücünü ve verimini analiz etmişlerdir. Kawasaki MA-13-CC ve GE LM2500 gaz türbinleri kullanılmıştır. Farklı TIT değeri için farklı basınç oranlarında verim ve güç değişimlerine bakılmıştır. Verimi maksimum yapan basınç oranının gücü maksimum yapan basınç oranlarından daha yüksek değerlerde olduğu görülmüştür.

Cardu ve Baica (2002), yaptıkları çalışmada, gaz türbinlerinde yanma odasına su enjekte edilmesiyle sistemin termal veriminde artış meydana geldiğini göstermişlerdir.

Wang ve Chiou (2002), yaptıkları bilgisayar simülasyon sonucunda GE Frame 6B basit çevrimini buhar püskürtmeli çevrime dönüştürdüklerinde verim yaklaşık %30'dan %40'a çıkarken çevrim gücünün de 38 MW'dan 50 MW'a çıktığını gözlemlediler. Buhar püskürtmeli sistem için maksimum çevrim gücünün daha yüksek basınç oranlarında meydana geldiği görüldü. Farklı çevre sıcaklıklarında basit çevrim için çevre sıcaklığının artışı ile belirgin bir şekilde net güçte düşüş görülürken buhar püskürtmeli sistem gücünde hafif bir azalış görülmüştür.

Marrero et al. (2002) Brayton-Rankine-Rankine çevrimlerinin bireştirilmesiyle oluşan bir çevrimde; Brayton çevrimi basınç oranı, gaz türbini giriş sıcaklığı, yanma odasına enjekte edilen buhar miktarı ve çığ noktası sıcaklığına bağlı olarak sistemlerdeki elemanlarda meydana gelen ekserji kayıplarını ve ekserji veriminde meydana gelen değişimi incelemiştir.

Andreas Poullikkas (2005), gaz türbini teknolojilerini incelemiştir. Cheng çevrimini de ele alarak termodinamik karakteristiklerini incelemiştir. Gaz türbinlerinin dizaynının enjekte edilen buhar miktarının kompresörden geçen havanın miktarının %5'ine kadar izin verebileceğini belirtmiştir. Buhar miktarının %1, %3, %5 olarak alınan artış miktarları ile güçte de artışlar meydana geldiği belirtilmiş ve artan çevre sıcaklığı ile birlikte güçte her durum için azalma görülmüştür. Cheng çevrimine örnek olarak M1A-13CC(KAWASAKİ), 501-KH(Allison Engine Company), LM 1600 STIG(General Elektrik), LM2500 STIG(General Elektrik), LM5000(General Elektrik) gaz türbinleri verilmiştir. Her birinin güç ve verimlerinde artış görüldüğü belirtilmiştir. Ekonomik sorun olarak bir kWh elektrik üretimi

için 1,1 ile 1,6 kg arasında saf suyun tüketildiğini belirtmiştir. Bunun da işletme giderlerini %5 artıracığını belirtmiştir.

KARAALİ ve ÖZTÜRK (2007), gaz türbinli kojenerasyon sistemlerinin verimini iyileştirme yöntemlerinin incelenmesi hakkındaki çalışmalarında dört verim artırma yönteminden biri olarak da yanma odasına buhar enjeksiyonu yöntemini incelemişler fakat ekonomik bir değerlendirme yapmamışlardır. Sisteme beslenen havanın kütleli debisinin % 5, 10, 13, 16, 19 ve 20 oranlarında sisteme, sistemin egzoz gazları yardımıyla üretilen buharın enjeksiyon yapılması sonucu sistemdeki değişiklikler (verim, elektrik ısı oranı vs.) gözlenmiştir. Sistemden elde edilen net işin arttığı gözlenmiştir. Buhar üretme miktarını ve buharın son sıcaklığını egzoz gazlarının türbinde çıkış sıcaklığının sınırladığını ve buhar püskürtme oranının %19 civarı ile sınırlı olduğunu belirtmiştir.

I.Roumeliotis, K.Mathioudakis (2009), buhar enjeksiyon tekniklerinin performans ve çalışabilirlik üzerine etkilerini incelemişlerdir. Çeşitli çalışma koşullarında farklı konfigürasyonlardaki gaz türbinlerinin çalışma durumlarını incelemek için bir jenerik performans modeli geliştirilmiştir. Yanma odasına püskürtülen buhar miktarındaki artışın, çevrim sabit TIT'de iken verimde bir artış meydana getirdiği ve bu artışın çevrim sabit yükte iken verimde meydana gelen artıştan daha fazla olduğu görüldü. Aynı şekilde buhar miktarındaki artış ile gaz türbini gücünün de arttığı belirtilmiş ve çevre sıcaklığı 0 C ve 15 C için sabit TIT'de yapılan incelemelerde düşük çevre sıcaklığındaki artışın diğerinden %50'ye kadar daha fazla olduğunu belirtmişlerdir.

3. CHENG ÇEVİRİMİ ÇALIŞMA PRENSİBİ VE KULLANIM ALANLARI

1976'da Cheng, egzoz gazlarının bir ısı geri kazanım buhar jeneratöründe buhar üretmek amacıyla kullanıldığı bir gaz türbini çevrimi tasarladı. Buna göre burada üretilen buhar gaz türbininin yanma odasına enjekte edilir ve böylece verimde kazanç ve güçte artış elde edilir. Bu çevrim çoğunlukça 'Cheng Çevrimi' veya 'Buhar Enjeksiyonlu Çevrim' olarak adlandırılır. Yanma odasına bir miktar buharın enjeksiyonu ile türbinden geçen gaz debisi artırıldığı için üretilen elektrik enerjisi üretim miktarı artırılmaktadır. Bu buhar miktarının artırılması sonucu sistemin su kaybı artmaktadır. Fakat buhar üretme miktarını ve buharın son sıcaklığını egzoz gazlarının türbinden çıkış sıcaklığı sınırlamaktadır (Paepe ve Dick, 2001).

Uygulanan buhar enjeksiyonu ile bir gaz türbininde yaklaşık %10'luk bir verim kazancı ile yaklaşık %50-70 güç artışı mümkündür 0,2 MWe ile 250 MWe arasında değişen kapasitelerdeki gaz türbinlerine (basit çevrim, kombine çevrim ve cheng çevrimi) ait verim bilgileri bulunmaktadır (Poullikkas, 2005).

Yanma odasına buhar enjeksiyonu aynı zamanda NOx emisyonunu azaltmak amacıyla da yaygın olarak kullanılır (Poullikkas, 2005).

Beklenildiği gibi basit çevrime ait verimler en düşük olanlarıdır. Kombine çevrimlere ait uygulamalar sadece 10 MWe ve daha üstü uygulamalarda bulunmaktadır. Bu aralık için en yüksek verimler bu tip çevrimlerde elde edilmektedir. Daha düşük güçlerde kombine çevrimin verimi, düşük güçte komponentlerinin verimlerinin azalması nedeniyle kötüleşmektedir. 10 MWe'den daha düşük güçlerde kombine çevrimler verimli olmamaktadır. Burada buhar enjeksiyonlu sistem çekici olmaktadır çünkü bu aralıkta hem basit çevrimden hem de kombine çevrimden daha iyi bir performans gösterirler (Paepe ve Dick, 2001). 1-50 MWe güç aralığında Cheng Çevrimi ilgi çekici olmaktadır. Ekonomik açıdan bakıldığında, buhar türbinine ihtiyaç duymadığı için, Cheng çevriminin daha düşük yatırım maliyetlerinin olduğu açıkça görülür.

Cheng Çevriminin en büyük dezavantajı çevrimin tükettiği sudur. Enjekte edilen buhar egzozla birlikte atmosfere atılır. GE LM5000 yaklaşık olarak 16,76 kg/s buhar tüketir. 6,05 MWe güç üreten Allison 501 KH ise 0,274 kg/s buhar tüketir. Genellikle su tüketimi 1.1 ile 1.6 kg/kWh' dir (Paepe ve Dick, 2001). Tuzson (1991)'a göre enjekte edilen buharın kaybı toplam kuruluş yakıt maliyetinin yaklaşık olarak %5'i kadar olmaktadır. Bu yüzden çevrimde enjekte edilen buharın geri kazanımına çalışılması anlamlı olacaktır. Cheng sisteminin orjinal patentinde bir kondenser çevrime katılmıştır. Fakat dizaynı veya boyutlandırması konusunda herhangi bir metoda yer verilmemiştir.

4. CHENG ÇEVİRİMİNİN TERMODİNAMİK ANALİZİ

4.1 Termodinamiğin I. Kanunu

Bir kontrol kütleinin herhangi bir çevrim için, termodinamiğin birinci kanunu ‘çevrim esnasındaki iş ve ısı alışverişi (aynı birimlerle) sıfırdır.’ Şeklinde ifade edilir. Bu ifade enerjinin korunumu ilkesinin bir başka anlatım biçimidir.

Kontrol kütleinin herhangi bir hal değişimi için termodinamiğin birinci kanunu kontrol kütleinin (W_{12}) ve ısı(Q_{12}) alış verişlerinin cebrik toplamı, kontrol kütleinin toplam enerjisinin değişimine eşit olur (Öztürk ve Kılıç, 1998) :

$$Q_{12} + W_{12} = E_2 - E_1 \quad (4.1)$$

Burada E_1 ve E_2 kontrol kütleinin ilk ve son hallerindeki toplam enerjileridir. Bu çalışmada kontrol kütleine yapılan iş ve verilen ısı pozitif (+ işaretli) ve kontrol kütleinin yaptığı iş ve verdiği ısı (- işaretli) kabul edilmektedir.

Termodinamikte enerji, maddenin yapısına bağlı iç enerji (U), potansiyel enerji (PE) ve kinetik enerji (KE) şekilleri göz önüne alınırsa, kontrol kütlei için termodinamiğin birinci kanunu (Öztürk ve Kılıç, 1998):

$$Q_{12} + W_{12} = U_2 - U_1 + m \cdot g \cdot (z_2 - z_1) + m \cdot (V_2^2 - V_1^2) / 2 \quad (4.2)$$

şeklinde yazılır.

Termodinamik bakımdan incelenmek üzere göz önüne alınan ‘belirli bir hacme’ kontrol hacmi (açık sistem) denir.

Kontrol yüzeyinin kütle alışverişi olan her bir bölgesinde maddenin özelliklerinin düzgün dağılım gösterdiği, bununla birlikte bir andaki iş ve ısı alışverişleri zamanla değişmediği açık sistemler sürekli-akışlı sürekli-açık (SASA) sistemler olarak tanımlanır.

Sürekli-akışlı sürekli-açık sistemde, kontrol hacminin kütle ve toplam enerjisi sabit olduğundan süreklilik denklemi ve termodinamiğin birinci kanunu aşağıdaki şekilde elde edilir (Öztürk ve Kılıç, 1998) :

$$\sum \dot{m}_g = \sum \dot{m}_f = \dot{m} \quad (4.3)$$

$$Q_{KH} - W_{KH} = \sum m \dot{c} \cdot (h_f + \frac{V_f^2}{2} + g \cdot z_f) - \sum m g \cdot (h_g + \frac{V_g^2}{2} + g \cdot z_g) \quad (4.4)$$

Yukarıdaki ‘g’ indisi giren akışı, ‘ç’ indisi çıkan akışı göstermektedir. Akışkanın kontrol hacmine giriş ve çıkışındaki kinetik ve potansiyel enerjilerinde çok az bir değişim olduğu varsayılırsa, bu bileşenlere ait değişimler sıfır kabul edilir ($\Delta KE=0$, $\Delta PE=0$).

4.2 Özgül Isılar

Maddenin iç enerji ve entalpi özellikleri doğrudan ölçülemediğinden basınç, sıcaklık ve özgül hacim gibi doğrudan ölçülebilen özelliklere bağlı bağıntılar yazılarak iç enerji ve entalpi fonksiyonları elde edilir. Mükemmel gazlarla ilgili özellik bağıntılarında kullanılan sabit hacimdeki özgül ısı (Öztürk ve Kılıç, 1998):

$$c_v = \left(\frac{\partial u}{\partial T} \right)_v \quad (4.5)$$

ve sabit basınçtaki özgül ısı:

$$c_p = \left(\frac{\partial h}{\partial T} \right)_p \quad (4.6)$$

şeklinde tarif edilir.

Buna göre özgül ısılardan faydalanarak mükemmel gaz için sabit hacim ve sabit basınçtaki özgül ısılar (c_{v0} , c_{p0}) elde edilir (Öztürk ve Kılıç, 1998):

$$c_{v0} = \frac{du}{dT} \text{ ise } du = c_{v0} \cdot dT \quad (4.7)$$

$$c_{p0} = \frac{dh}{dT} \text{ ise } dh = c_{p0} \cdot dT \quad (4.8)$$

Elde edilen bağıntılardan görüleceği üzere, mükemmel gazın sabit hacimdeki ve sabit basınçtaki özgül ısıları da sadece sıcaklığın fonksiyonudurlar.

Mükemmel gazın özgül ısıları arasında

$$c_{p0} - c_{v0} = R \quad (4.9)$$

bağıntısı mevcuttur. Burada, R gaz sabiti olup

$$R = \frac{R^-}{M} \quad (4.10)$$

şeklindedir. R^- , evrensel gaz sabitinin (R) o maddenin mol kütlesine (M) bölünmesi ile elde edilir. Mükemmel gazın sıcaklığa bağlı olarak iç enerjilerinin ve entalpilerinin değişimi (4.7) ve (4.8) bağıntılarının integralleri alınarak

$$u_2 - u_1 = \int_1^2 c_{v0}(T) \cdot dT \quad (4.11)$$

$$h_2 - h_1 = \int_1^2 c_{p0}(T) \cdot dT \quad (4.12)$$

bulunabilir. Sabit basınçtaki molar özgül ısıların sıcaklığa bağlı olarak denklemleri bazı maddeler için Çizelge 4.1’de verilmiştir.

Çizelge 4.1 Bazı mükemmel gazların sabit basınçta özgül ısı denklemleri (Öztürk ve Kılıç, (1998))

Madde	M (kg/kmol)	Geçerli Aralık (K)	$c_{p0}^- (\theta)$, Sabit basınçta özgül ısı denklemi (kJ/kmol-K)
Hava	28,97	273-1770	$c_{p0}^- = 28,016 + 0,19665 \cdot \theta + 0,048023 \cdot \theta^2 - 0,001961 \cdot \theta^3$
CO_2	44,010	300-3500	$c_{p0}^- = -3,7357 + 30,529 \cdot \theta^{0,5} - 4,1034 \cdot \theta^1 - 0,024198 \cdot \theta^2$
O_2	31,999	300-3500	$c_{p0}^- = 3,7432 + 0,020102 \cdot \theta^{1,5} - 178,57 \cdot \theta^{-1,5} + 236,88 \cdot \theta^{-2}$
H_2O	18,015	300-3500	$c_{p0}^- = 143,05 - 183,54 \cdot \theta^{0,25} + 82,751 \cdot \theta^{0,5} - 3,6989 \cdot \theta^1$
N_2	28,013	300-3500	$c_{p0}^- = 39,06 - 512,79 \cdot \theta^{-1,5} + 1072,7 \cdot \theta^{-2} - 820,4 \cdot \theta^{-3}$
CH_4	16,043	300-2000	$c_{p0}^- = -672,87 + 439,74 \cdot \theta^{0,25} - 24,875 \cdot \theta^{0,75} + 323,88 \cdot \theta^{-0,5}$

Özgül ısıların sıcaklığa bağlı tablolar halinde kullanılması yerine referans bir sıcaklıktan itibaren (4.11) ve (4.12) numaralı bağıntıların kullanılması ile en doğru neticeler elde edilir.

4.3 Gaz Karışımları

Bir gaz karışımının özellikleri doğal olarak onu oluşturan gazların, bir başka deyişle karışanların özelliklerine ve karışımdaki miktarlarına bağlıdır.

Bir karışımda, bir karışanın mol sayısının toplam mol sayısına oranına mol oranı denir ve aşağıdaki eşitlikle ifade edilir (Öztürk ve Kılıç, 1998):

$$y_{ni} = y_i = \frac{n_i}{n} \quad (4.13)$$

Bir karışanın kütlelerinin toplam kütle oranına ise ‘kütle oranı’ denir ve aşağıdaki eşitlikle ifade edilir (Öztürk ve Kılıç, 1998):

$$y_{mi} = \frac{m_i}{m} \quad (4.14)$$

Mol oranı ile kütle oranı arasındaki bağıntı, i karışanın mol kütlesi M_i ve karışımın mol kütlesi M_{kar} olmak üzere aşağıdaki ifadeyle yazılabilir (Öztürk ve Kılıç, 1998):

$$y_i \cdot \frac{M_i}{M_{kar}} = y_{mi} \quad (4.15)$$

Yukarıda elde edilen ifadenin uygun şekilde toplamı alınarak aşağıdaki ifade elde edilir:

$$M_{kar} = \sum y_i \cdot M_i \quad (4.16a)$$

Böylece mol oranları bilinen bir gaz karışımı için kütle oranların da bulunmasında aşağıdaki bağıntı kullanılabilir:

$$\frac{1}{M_{kar}} = \sum_i \frac{y_{mi}}{M_i} \quad (4.16b)$$

Kütle oranları kullanılarak gaz karışımının özgül gaz sabiti

$$R_{kar} = \sum y_i \cdot R_i \quad (4.17)$$

şeklinde ifade edilir. Karışıma ait özgül ısıların hesabında da karışımdaki her bir karışanın mol oranı bulunarak

$$c_{p0} = \sum_i y_i \cdot c_{p0i} \quad (4.18)$$

karışımın molar özgül ısısı elde edilir (Öztürk ve Kılıç, 1998). Sonuç olarak karışıma ait çeşitli özelliklerin hesabında genellikle her bir gazın ayrı ayrı özellikleri bulunarak toplanır. Bu metod ile özgül ısılar, özgül gaz sabiti, k sabiti gibi değerler hesaplanabilir.

4.4 Yanma

Yakıt bileşenlerinin oksijen ile birleşmesinin neticesinde kimyasal enerjinin ısı enerjisiye dönüştüğü işleme yanma denir.

Teorik (tam) yanma için gerekli olan minimum hava miktarına teorik hava miktarı denir. Fakat yakıt teorik miktardan daha fazla hava ile karıştırılmazsa yakıt moleküllerinin bir kısmı gerekli oksijeni bulamayacağından tam yanma gerçekleşmez. Dolayısıyla yanmanın tamamlanması için teorik hava miktarından daha fazla hava kullanılır. Denklemlerde gerçek hava miktarı gösterilirken, teorik havanın yüzdesi veya %(yüzde) fazla hava olarak ifade edilir.

$$\Psi = \frac{\text{Gerçek hava miktarı}}{\text{Teorik hava miktarı}} \quad (4.19)$$

Şeklinde elde edilen Ψ katsayısına hava fazlalık katsayısı denir.

Yanma sırasında kütle korunumu prensibinden reaksiyona giren maddelerin kütlesi, çıkan maddelerin kütlesine eşit olmaktadır. Her elementin atom sayısı sabit kalır fakat mol sayısı değişmektedir. Yanma işlemi başlangıcındaki maddelere yanma işlemine girenler, yanma işlemi sona erdiğinde açığa çıkan maddelere de yanma sonu ürünleri denir (Öztürk ve Kılıç, 1998).

4.5 Formasyon Entalpisi

Yanma işleminde maddelerin cinsleri ve miktarları değiştiğinden genel bir referans hale dayanan özellikler ve özellik bağıntıları kullanılmaktadır. Referans hal olarak atmosferik çevre şartları, normal şartlar olarak (25 °C, 100kPa) seçilir ve normal şartlar altında bulunan Fe, Al, O_2 , C, N_2 gibi maddelerin entalpileri sıfır kabul edilir ve bu maddelerden elde edilen FeO, AlO, H_2O , CO_2 , CO, NO gibi maddelerin oluşumu için verilen veya çekilen ısı miktarına formasyon entalpisi denir ve h_f^0 şeklinde gösterilir.

Formasyon esasına göre entalpi değerleri aşağıdaki bağıntı kullanılarak hesaplanabilir (Öztürk ve Kılıç, 1998):

$$h_{T,P}^- = h_f^0 + (h_{T,P}^- - h_{25^\circ C, 100kPa}^-) \quad (4.20)$$

Yukarıdaki bağıntıda parantez içerisinde bulunan değer Δh^- ile gösterilir. Δh^- değeri, saf maddenin tablo veya diyagramlarından, mükemmel gaz kabulü yapılarak (4.12) denkleminde veya mükemmel gaz kabulü yapılmadığı takdirde genelleştirilmiş diyagramlardan yararlanılarak bulunabilir.

4.6 Kimyasal Reaksiyonlarda Termodinamiğin Birinci Kanunu

Formasyon entalpisi esasına dayanan entalpi değerleri termodinamiğin birinci kanun denklemlerine uygulanabilir. Kinetik ve potansiyel enerjilerin ihmal edildiği sürekli akışlı açık sistem için birinci kanun denklemi

$$Q_A + W_A = H_{YIÇ} - H_{YIG} = \sum_{\text{çıkış}} n_{\xi} \cdot (h_{\xi}^0 + \Delta h_{\xi}^-) - \sum_{\text{giriş}} n_{\xi} \cdot (h_{\xi}^0 + \Delta h_{\xi}^-) \quad (4.21)$$

şeklinde yazılır (Öztürk ve Kılıç, 1998).

Sürekli akışlı sürekli açık sistemde, çevre ile hiç ısı alışverişi olmayan, kinetik ve potansiyel enerji değişimlerinin ihmal edilebildiği ve hiç iş yapılmayan bir yanma işlemi sonunda elde edilen maksimum sıcaklığa adyabatik alev sıcaklığı denir. Adyabatik alev sıcaklığı, yanmaya ve hava (oksijen) miktarına bağlıdır. Teorik hava miktarı ile tam yanmada adyabatik alev

sıcaklığı maksimum olur. Hava fazlalık katsayısı ile adyabatik alev sıcaklığı kontrol edilebilir. Böylelikle, adyabatik alev sıcaklığının elde edildiği bir yanma işleminde termodinamiğin birinci kanunu:

$$Q_A = W_A = H_{VIÇ} - H_{YIG} = 0 \quad (4.22)$$

şeklinde yazılabilir (Öztürk ve Kılıç, 1998).

5. ÖRNEK SİSTEMİN SEÇİMİ VE PERFORMANSININ İNCELENMESİ

5.1 Örnek Cheng Çevrimi Çalışma prensibi

Kompresör tarafından emilen hava (1), sıkıştırılarak basıncı ve sıcaklığı artırılır (2). Basıncı ve sıcaklığı artan hava daha sonra, yakıtın (doğalgaz) sabit basınçta yakıldığı yanma odasına gönderilir. Yanma odasına 'su buharı' enjeksiyonu yapılır (8). Yanma işlemi sonucunda oluşan yüksek sıcaklıktaki gazlar (3), türbinde genişlerken iş yapar. Türbinde genişleme sonucunda basıncı ve sıcaklığı azalan egzoz gazı ısı değiştiricisine gönderilir (4). Isı değiştiricisinde egzoz gazlarının ısıyla üretilen buhar(8), sistemin performansı üzerindeki etkilerini incelemek amacıyla değişen miktarlarda (2.5, 5, 7.5, 10, 12.5, 15.5, 17.5, 20, 22.5 kg/s su buharı) yanma odasına gönderilir (Şekil 5.1).

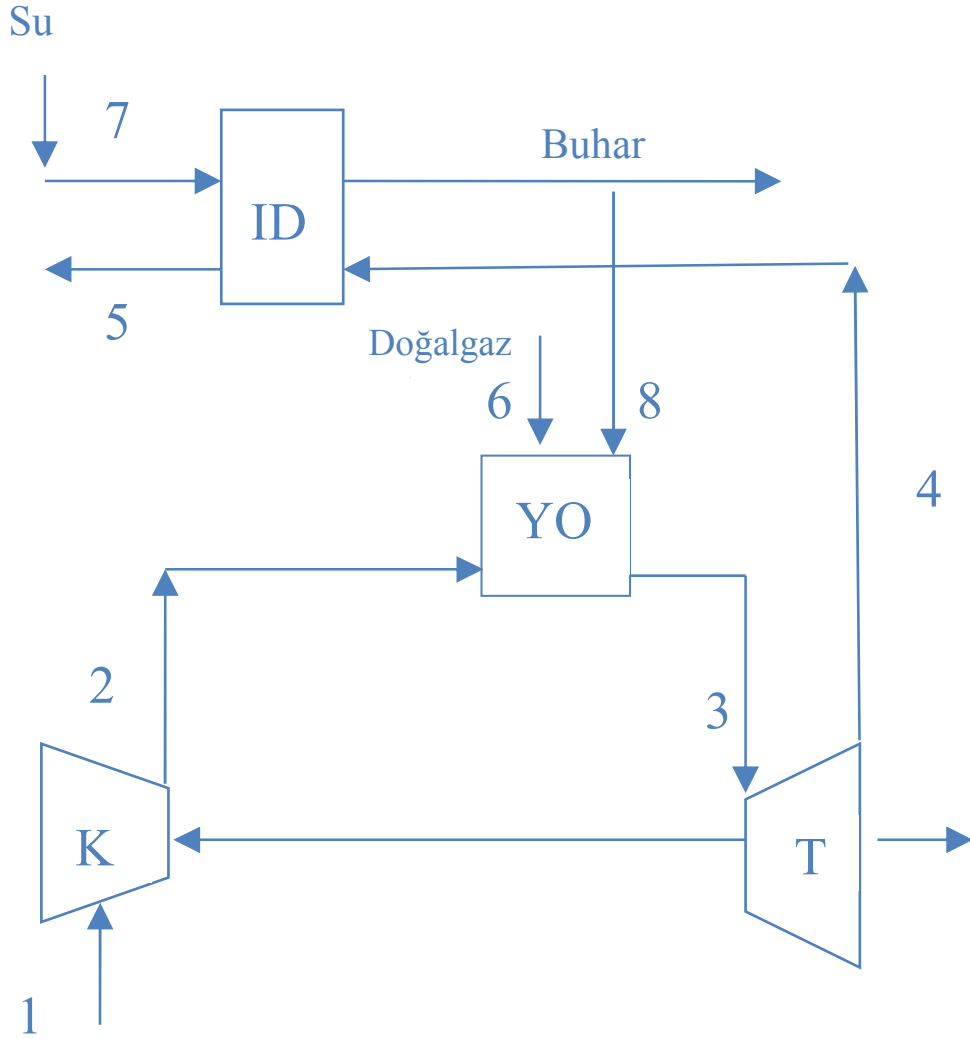
5.2 Sabit Basınç Oranında ve Değişen Su Buharı Püskürtme Miktarlarındaki Cheng Çevrimi Dizayn Parametreleri Seçimi

Çizelge 5.1 Cheng çevrimi için seçilen çalışma parametreleri

Kompresöre giren havanın sıcaklığı	298 [K]
Kompresöre giren havanın basıncı	1,01325 [bar]
Kompresöre giren havanın kütleli debisi, \dot{m}_h	100 [kg/s]
Yakıtın kütleli debisi, \dot{m}_y	3,5 [kg/s]
Bağıl nem, ϕ	% 75
Çevrimin basınç oranı, P_r	10
Yakıtın mol bileşimi,%	$CH_4: 94,7 + C_2H_6: 3,75 + C_3H_8: 0,89 + N_2: 0,66$
Isı değiştiricisi besleme suyu giriş sıcaklığı	298 [K]
Isı değiştiricisinde elde edilen buharın sıcaklığı	500 [K]
Isı değiştiricisinde elde edilen buharın basıncı	10,1325 [bar]
Isı değiştiricisinde elde edilen buharın kütleli debisi	2,5-5-7,5-10-12,5-15,5-17,5-20-22,5 [kg/s]
Isı değiştiricisinden çıkan gazların sıcaklığı	500 [K]
Isı değiştiricisi verimi	0,85

5.2.1 Yapılan Kabuller

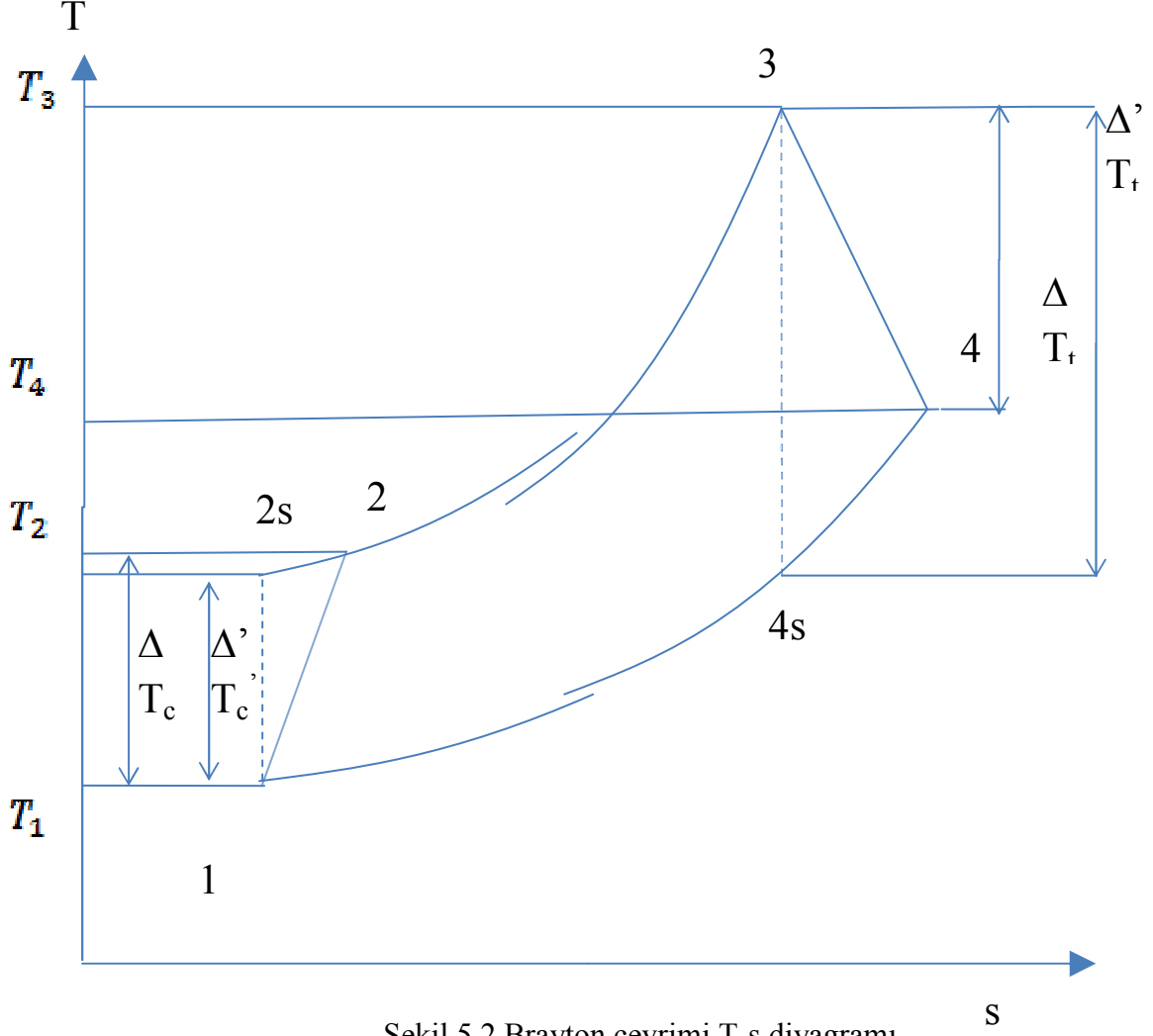
- Basınç kayıpları kompresör çıkışı ve türbin girişi arasında % 8; türbin çıkışında % 5 olarak alınmıştır.
- Yanmanın tam yanma olduğu kabul edilmiştir.
- Kinetik ve potansiyel enerjiler ihmal edilmiştir.
- Gaz türbini ve kompresör politropik verimleri sırasıyla 0,86 ve 0,85 olarak alınmıştır.
- Gaz türbini ve kompresörün mekanik verimleri 0,98 olarak alınmıştır.



Şekil 5.1 Örnek bir Cheng Çevrimi sisteminin genel şeması

5.2.2 Kompresör

5.2.2.1 Kompresör Çıkış Sıcaklığının Hesaplanması



Şekil 5.2 Brayton çevrimi T-s diyagramı

$$\frac{T_2'}{T_1} = \left[\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right] = r_C^\alpha \quad \text{ve } \alpha = \frac{k-1}{k} \quad (5.1)$$

$$k = 1,388 \text{ (kabul)}$$

$$\eta_{cis} = \frac{\Delta T_C'}{\Delta T_C} = \frac{T_2' - T_1}{T_2 - T_1} \quad (\text{Küçükkaramıklı, E.}) \quad (5.2)$$

$$T_2 = T_1 + \frac{T_1}{\eta_{cis}} \cdot \left[\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right] \quad (5.3)$$

denklemini çözülürse kompresör çıkış sıcaklığı;

$$T_2 = 630,3 \text{ K}$$

olarak bulunur.

5.2.2.2 Kompresör Gücünün Hesaplanması

Havanın sabit basınçtaki özgül ısısı:

$$C_{poh} = 1,0250 \text{ (kJ/kg K)} \text{ olarak alındı.}$$

Havanın sabit hacimdeki özgül ısısı:

$$C_{vo} = 0,7380 \text{ (kJ/kg K)} \text{ olarak alındı.}$$

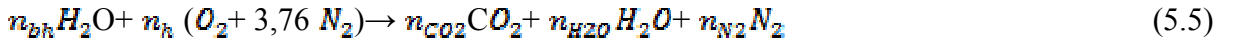
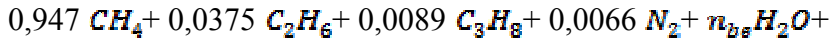
$$k = \frac{C_{poh}}{C_{vo}}$$

$$P_R = \dot{m}_h \cdot C_{poh} \cdot (T_2 - T_1) / \eta_m \quad (\text{kW}) \quad (5.4)$$

(5.4) denklemini çözülürse kompresör işi:

$$P_R = 34763,84 \text{ kW} \text{ olarak bulunur.}$$

5.2.3 Yanma Odası



Yanma işleminin kimyasal denklemi (5.5) eşitliğindeki gibidir. (5.5) eşitliğinde, $n_{b\sigma}$ yanma odasına enjekte edilen su buharının mol miktarını göstermektedir. Yanma odasına giren havanın mol miktarı, yanma odasına giren havanın ve yakıtın kütleli debisi bilindiğinden, hava-yakıt oranı (HY) kullanılarak bulunabilir (Öztürk ve Kılıç, 1998):

$$HY = \frac{\dot{m}_h}{\dot{m}_y} = \frac{(nM)_h}{(nM)_y} \quad (5.6)$$

(5.6) eşitliğinde, m kütleli debiyi, M mol kütleli, h indisi havayı, y indisi yakıtı temsil etmektedir. (5.6) eşitliği kullanılarak yanma işlemine giren havanın mol miktarı aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$\frac{100}{3,5} = \frac{4,76 \cdot 28,97 \cdot n_h}{0,947 \cdot 16,043 + 0,0375 \cdot 30,07 + 0,008944 \cdot 0,97 + 0,0066 \cdot 28,013}$$

denklemin çözümünden

$$n_h = 3,500744 \text{ kmol bulunur.}$$

Yanma işleminde; $(4,76 \cdot n_h)$ kmol kuru havayla giren su buharının(neminin) kısmi basıncı, bağıl nem bilindiği için bulunabilir:

$$P_{bh} = \phi_h \cdot P_{doyma,25^\circ\text{C}}$$

$$P_{bh} = 0,75 \cdot 0,02982$$

$$P_{bh} = 0,02236 \text{ bar}$$

olarak bulunur.

Mükemmel gaz kabulüyle, 16,66 $(4,76 \cdot n_h)$ kmol kuru hava içerisindeki su buharının mol miktarı n_{bh} hesaplanabilir:

$$n_{bh} = \left[\frac{P_{bh}}{P_{toplam}} \right] \cdot n_{toplam} \text{ ise;}$$

$$n_{bh} = \left[\frac{0,75 \cdot 0,02982}{1,01325} \right] \cdot [n_{bh} + 4,76 \cdot n_h]$$

denkleminin çözülmesiyle;

$$n_{bh} = 0,376 \text{ kmol}$$

olarak bulunur.

Yanma odasına enjekte edilen buharın mol miktarı ise buhar-yakıt oranı (BY) kullanılarak bulunur:

$$BY = \frac{m_{hg}^+}{m_y^+} = \frac{(n \cdot M)_{hg}}{(n \cdot M)_y} \quad (5.7)$$

(5.7) eşitliği kullanılarak yanma odasına giren (enjekte edilen) su buharının mol miktarı aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$n_{b\#} = \frac{n_y \cdot M_y \cdot m_{b\#}^y}{M_{b\#} \cdot m_y^y} \text{ ise,}$$

değişen buhar miktarları için $n_{b\#}$ değerleri, yukarıdaki denklemin kullanılmasıyla aşağıdaki gibi bulunur:

Çizelge 5.2 Değişen buhar miktarları için su buharı mol değerleri

$m_{b\#} [kg/s]$	$n_{b\#} [kmol]$
0	0
2,5	0,669985
5	1,339971
7,5	2,009956
10	2,679941
12,5	3,349927
15,5	4,226803
17,5	4,689897
20	5,359883
22,5	6,029868

Yanma sonu ürünlerinin mol miktarları, her elementte kütle korunumu ilkesi uygulanarak bulunur. Başka bir ifadeyle, (5.5) eşitliğindeki her elementin yanma sonu ürünleri içindeki toplam kütlesi veya mol miktarı, yanma işlemine girenler içindeki toplam kütlesi veya mol miktarına eşit olmak zorundadır:

$$C: 0,947 + 0,0375 \cdot 2 + 0,0089 \cdot 3 = n_{CO_2}$$

$$\rightarrow n_{CO_2} = 1,0487 \text{ kmol}$$

$$H: 0,947 \cdot 4 + 0,0375 \cdot 6 + 0,0089 \cdot 8 + 2n_{b\#} + 2n_{bH} = 2n_{H_2O}$$

$$\rightarrow n_{H_2O} = (0,947 \cdot 4 + 0,0375 \cdot 6 + 0,0089 \cdot 8 + 2n_{b\#} + 2n_{bH}) / 2$$

$$O: n_{b\#} + n_{bH} + 2n_{bH} = 2n_{CO_2} + n_{H_2O} + 2n_{O_2}$$

$$\rightarrow n_{O_2} = (n_{b\#} + n_{bH} + 2n_{bH} - 2n_{CO_2} + n_{H_2O}) / 2$$

$$N_2: 0,0066+3,76.n_n = n_{N_2}$$

ise;

Yukarıdaki ifadeler kullanılarak değişen buhar miktarları için elementlerin yanma denklemiindeki mollerini (n_i), aşağıdaki gibidir:

Çizelge 5.3 Değişen su buharı debisi için yanma elementleri mol değerleri (n_i)

mbe (kg/s)	n_{H_2O} (kmol)	n_{CO_2} (kmol)	n_{O_2} (kmol)	n_{N_2} (kmol)
0	2,418208	1,0487	1,430994	13,1694
2,5	3,088194	1,0487	1,430994	13,1694
5	3,758179	1,0487	1,430994	13,1694
7,5	4,428164	1,0487	1,430994	13,1694
10	5,09815	1,0487	1,430994	13,1694
12,5	5,768135	1,0487	1,430994	13,1694
15,5	6,645012	1,0487	1,430994	13,1694
17,5	7,108106	1,0487	1,430994	13,1694
20	7,778091	1,0487	1,430994	13,1694
22,5	8,448076	1,0487	1,430994	13,1694

Yanma sonu ürünlerini oluşturan karışımların mol oranları ($y_{n,i}$) ise, her bir karışımın mol miktarının, karışımın mol miktarına bölünmesi ile bulunur:

$$y_{n,CO_2} = \frac{n_{CO_2}}{n}$$

$$y_{n,H_2O} = \frac{n_{H_2O}}{n}$$

$$y_{n,O_2} = \frac{n_{O_2}}{n}$$

$$y_{n,N_2} = \frac{n_{N_2}}{n} \text{ ise;}$$

yanma odasına enjekte edilen su buharı miktarına göre elementlerin mol oranları ve yanma sonu ürünlerinin mol miktarı aşağıdaki gibidir:

Çizelge 5.4 Yanma sonu ürünlerinin toplam mol miktarları ve yanma sonu ürünlerini oluşturan karışanların mol oranları ($Y_{n,i}$)

mbe (kg/s)	$n_{toplam,y\ddot{u}}$	Y_{n,H_2O}	Y_{n,CO_2}	Y_{n,O_2}	Y_{n,N_2}
0	18,06730195	0,133844	0,058044	0,079204	0,728908
2,5	18,73728728	0,164815	0,055969	0,076371	0,702844
5	19,40727261	0,193648	0,054036	0,073735	0,678581
7,5	20,07725794	0,220556	0,052233	0,071274	0,655936
10	20,74724327	0,245727	0,050546	0,068973	0,634754
12,5	21,4172286	0,269322	0,048965	0,066815	0,614897
15,5	22,29410539	0,298061	0,047039	0,064187	0,590712
17,5	22,75719925	0,312345	0,046082	0,062881	0,578692
20	23,42718458	0,332011	0,044764	0,061083	0,562142
22,5	24,09716991	0,350584	0,04352	0,059384	0,546512

5.2.4 Adyabatik Alev Sıcaklığının Hesaplanması

Kinetik ve potansiyel enerji değişimleri ihmal edildiği zaman, kimyasal reaksiyonun olduğu sürekli akışlı açık bir sistemde enerjinin korunumu bağıntısı (4.21) denkleminin düzenlenmesiyle aşağıdaki gibi yazılır (Öztürk ve Kılıç, 1998):

$$Q-W = \sum_f n_f \cdot (h_f^{-o} + h^- - h^{-o})_f - \sum_g n_g \cdot (h_g^{-o} + h^- - h^{-o})_g \quad (5.8)$$

$h_f^{-o} + h^- - h^{-o}$ sırasıyla oluşum entalpisini, verilen haldeki duyulur entalpiyi ve standart referans hali olan 25°C ve 1 atmosfer basınçtaki duyulur entalpiyi göstermektedir. Yanma işlemine giren maddelerin ve yanma sonu ürünlerinin oluşum ve duyulur entalpileri Çizelge 5.5'de verilmiştir. Sürekli akışlı bir yanma işleminin adyabatik alev sıcaklığı, enerjinin korunumu bağıntısında Q ve W sıfıra eşitlenerek belirlenir (Öztürk ve Kılıç, 1998):

$$\sum_f n_f \cdot (h_f^{-o} + h^- - h^{-o})_f = \sum_g n_g \cdot (h_g^{-o} + h^- - h^{-o})_g \quad (5.9)$$

Çizelge 5.5 Yanma işlemine giren maddelerin ve yanma sonu ürünlerinin oluşum ve duyulur entalpileri (Öztürk ve Kılıç, (1998))

Madde	h_f° (kJ/kmol)	$h_{T_2}^-$ (kJ/kmol)	h_{500K}^- (kJ/kmol)	h_{298K}^- (kJ/kmol)
CH_4	-74850	–	–	–
C_2H_6	-84680	–	–	–
C_3H_8	-103850	–	–	–
N_2	–	18368,35	–	8608,064
O_2	–	18384,421	–	8207,421
H_2O	-241820	21330	16698,881	9778,881
CO_2	-393520	–	–	8995,058

$h_{T_2}^-$: Kompresör çıkışındaki duyulur entalpi

h_{500K}^- : Yanma odasına enjekte edilen buharın duyulur entalpisi

h_{298K}^- : Referans halindeki (25°C ve 1,01325 bar) duyulur entalpi

Çizelge 5.5’de verilen değerler (5.9) eşitliğinde yerine konulursa:

$$[n_{CO_2} \cdot (h_f^{\circ} + h_3^- - h_{298K}^-)_{CO_2} + n_{H_2O} \cdot (h_f^{\circ} + h_3^- - h_{298K}^-)_{H_2O} + n_{O_2} \cdot (h_3^- - h_{298K}^-)_{O_2} + n_{N_2} \cdot (h_3^- - h_{298K}^-)_{N_2} = n_{CH_4} \cdot (h_f^{\circ})_{CH_4} + n_{C_2H_6} \cdot (h_f^{\circ})_{C_2H_6} + n_{C_3H_8} \cdot (h_f^{\circ} + h_{500K}^- - h_{298K}^-)_{H_2O} + n_{buh} \cdot (h_f^{\circ} + h_{T_2}^- - h_{298K}^-)_{H_2O} + n_{N_2} \cdot 3,76 \cdot (h_{T_2}^- - h_{298K}^-)_{N_2}] \quad (5.10)$$

eşitliği elde edilir.

h_3^- : yanma sonu entalpi değeri.

Buna göre, (5.9) eşitliğinin sağ tarafındaki değerlerin toplamı, değişen buhar miktarları için aşağıdaki çizelgedeki gibidir:

Çizelge 5.6 Enjektde edilen su buharı miktarlarına göre yanma işlemine giren maddelerin toplam enerjisi

$m_{b\text{e}}$ (kg/s)	$\sum_g n_g \cdot (h_f^{-o} + h^- - h^{-0})_g$ (kJ)
0	2503,395
2,5	-154876
5	-312256
7,5	-469635
10	-627015
12,5	-784394
15,5	-990373
17,5	-1099153
20	-1256533
22,5	-1413913

$$n_{CO_2} \cdot (h_f^{-o} + h_3^- - h_{298K}^-)_{CO_2} + n_{H_2O} \cdot (h_f^{-o} + h_3^- - h_{298K}^-)_{H_2O} + n_{O_2} \cdot (h_3^- - h_{298K}^-)_{O_2} + n_{N_2} \cdot (h_3^- - h_{298K}^-)_{N_2} = \sum_{\varphi} n_{\varphi} \cdot (h_f^{-o} + h^- - h^{-0})_{\varphi} \quad (5.11)$$

denklemini sadeleştirilirse;

$$\sum_{\varphi} n_{\varphi} \cdot (h_f^{-o} + h^- - h^{-0})_{\varphi} = -393520 \cdot n_{CO_2} + \Delta h_{CO_2} \cdot n_{CO_2} - n_{H_2O} \cdot 241820 + \Delta h_{H_2O} \cdot n_{H_2O} + n_{O_2} \cdot \Delta h_{O_2} + n_{N_2} \cdot \Delta h_{N_2} \quad (5.12)$$

elde edilir.

$$\Delta h_{CO_2} = cp_{CO_2} \cdot T_3 = (-3,7357 + 30,529 \cdot \theta^{0,5} - 4,1034 \cdot \theta^1 - 0,024198 \cdot \theta^2) \cdot T_3$$

$$\Delta h_{H_2O} = cp_{H_2O} \cdot T_3 = (143,05 - 183,54 \cdot \theta^{0,25} + 82,751 \cdot \theta^{0,5} - 3,6989 \cdot \theta^1) \cdot T_3$$

$$\Delta h_{O_2} = cp_{O_2} \cdot T_3 = (3,7432 + 0,020102 \cdot \theta^{1,5} - 178,57 \cdot \theta^{-1,5} + 236,88 \cdot \theta^{-2}) \cdot T_3$$

$$\Delta h_{N_2} = cp_{N_2} \cdot T_3 = (39,06 - 512,79 \cdot \theta^{-1,5} + 1072,7 \cdot \theta^{-2} - 820,4 \cdot \theta^{-3}) \cdot T_3 \quad (5.13)$$

$$\theta = \frac{T_3}{100}$$

Δh_{CO_2} , Δh_{H_2O} , Δh_{O_2} , Δh_{N_2} değerleri, (5.12) denkleminde yerlerine konulursa değişen su buharı miktarları için adyabatik alev sıcaklığı değerleri aşağıdaki çizelgedeki gibi bulunur:

Çizelge 5.7 Enjekte edilen su buharı miktarları için adyabatik alev sıcaklığı (T_3) değerleri

m_{bs} (kg/s)	$C_{p_{CO_2}}(T_3)$	$C_{p_{H_2O}}(T_3)$	$C_{p_{O_2}}T_3$	$C_{p_{N_2}}T_3$	T_3 (K)
0	58,21	46,5	36,5	34,65	1466
2,5	57,90	46,03	36,33	34,5	1416,5
5	57,61	45,6	36,2	34,35	1371,5
7,5	57,32	45,14	36,06	34,2	1330,4
10	57,04	44,73	35,9	34,06	1293
12,5	56,76	44,35	35,8	33,93	1258
15,5	56,41	44	35,7	33,76	1216
17,5	56,23	43,66	35,6	33,67	1195
20	55,97	43,34	35,5	33,55	1167
22,5	55,72	43	35,4	33,44	1141

Çizelge 5.7’de görüldüğü gibi, yanma odasına püskürtülen buhar miktarının artmasıyla birlikte çevrimin adyabatik alev sıcaklığı azalmaktadır. Çünkü, yakıt miktarı sabit kalırken, yanma sonu sıcaklığına ulaşması gereken su buharı miktarı artmaktadır.

5.2.5 Gaz Türbini

5.2.5.1 Gaz Türbini Çıkış Sıcaklığının Bulunması

$$\frac{T_4}{T_3} = 1 - \eta_{tts} \cdot \left[1 - \left(\frac{P_4}{P_3} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right] \quad (5.14)$$

(5.14) eşitliğinin çözülmesiyle türbin çıkış sıcaklığı bulunur:

Çizelge 5.8 Türbin çıkış sıcaklıkları (T_4)

$m_{b\#}$ (kg/s)	T_3 (K)	T_4 (K)
0	1466	899,2
2,5	1416,5	869
5	1371,5	841
7,5	1330,4	816
10	1293	793
12,5	1258	771
15,5	1216	746
17,5	1195	733
20	1167	716
22,5	1141	700

Çizelge 5.8’de değişen buhar püskürtme miktarlarında, türbin çıkışındaki karışım gazlarının sıcaklıkları incelendiğinde, püskürtülen buhar miktarının artmasıyla beraber türbin çıkışındaki sıcaklıkların da azaldığı görülmektedir.

5.2.5.2 Çevrimden Elde Edilen Net Gücün Hesaplanması

$$W_{\text{tür}} = \frac{m'_{ysü}}{M_{ysü}} \cdot \eta_m \cdot (h_3 - h_4) \quad \text{kW} \quad (5.15)$$

$$m'_h + m'_{b\#} + m'_y = m'_{ysü}$$

$m'_{ysü}$: yanma sonu ürünlerinin kütleli debisi (kg/s)

$M_{ysü}$: yanma sonu ürünlerinin mol kütlelerinin toplamı (kg/kmol)

$$M_{ysü} = y_{n,CO_2} \cdot M_{CO_2} + y_{n,H_2O} \cdot M_{H_2O} + y_{n,O_2} \cdot M_{O_2} + y_{n,N_2} \cdot M_{N_2} \quad (5.16)$$

Çizelge 5.9 Yanma ürünlerinin mol kütleleri M_i

Karışan (i)	Mol kütlesi(kg/kmol)
CO_2	44,010
H_2O	18,015
O_2	31,999
N_2	28,0138

Çizelge 5.10 Enjekte edilen su buharı miktarları için özgül ısı değerleri

$m_{b,s}$ (kg/s)	$C_{p_{CO_2}}(T_4)$	$C_{p_{H_2O}}(T_4)$	$C_{p_{O_2}}T_4$	$C_{p_{N_2}}T_4$	T_4 (K)
0	52,879242	40,102083	34,2811	32,18078	899,2
2,5	52,437214	39,718119	34,11237	31,99654	869
5	52,015059	39,366686	33,95151	31,82377	841
7,5	51,611245	39,043846	33,79776	31,66157	816
10	51,224353	38,746256	33,6505	31,50911	793
12,5	50,853149	38,471117	33,50919	31,36569	771
15,5	50,389128	38,14096	33,33246	31,19057	746
17,5	50,153371	37,978904	33,24263	31,10346	733
20	49,822858	37,757985	33,11665	30,98355	716
22,5	49,50413	37,55172	32,9951	30,87046	700

$$h_3 = T_3 \cdot \sum y_{n,i} \cdot c_{p_{o,i}}$$

$$h_4 = T_4 \cdot \sum y_{n,i} \cdot c_{p_{o,i}} \quad (\text{Öztürk ve Kılıç, 1998}) \quad (5.17)$$

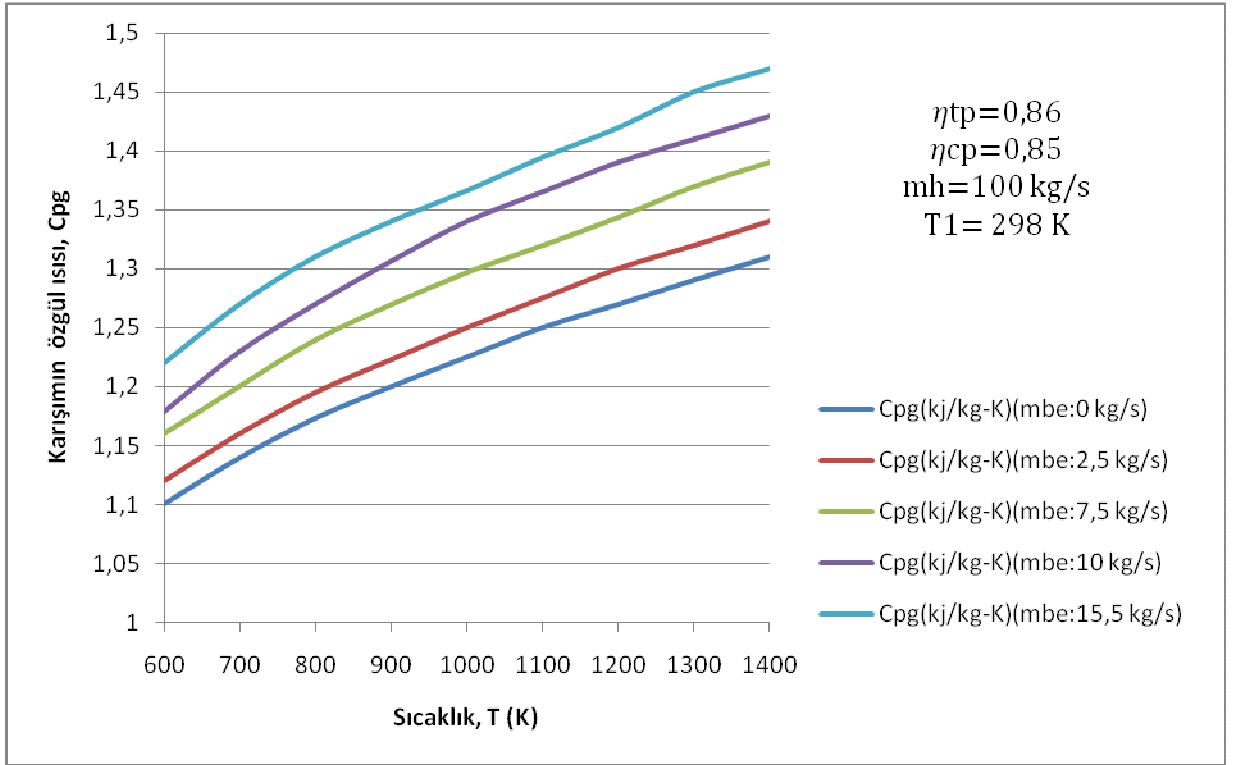
(5.17) denkleminin çözümünden, türbin girişindeki ve çıkışındaki entalpi değerleri bulunur (Çizelge 5.11).

Çizelge 5.11 Türbin girişinde (h_3) ve çıkışında (h_4) egzoz gazı entalpi değerleri

$m_{b,s}$ (kg/s)	h_3^- (kJ/kmol)	h_3 (kJ/kg)	Cpg3 (kJ/kg-K)	h_4^- (kJ/kmol)	h_4 (kJ/kg)	Cpg4 (kJ/kg-K)
0	55346	1982	1,35	31120	1115	1,24
2,5	53615	1945	1,37	30041	1090	1,254
5	52003	1909	1,39	29052	1067	1,268
7,5	50498	1875	1,41	28141,5	1045	1,28
10	49091	1843	1,425	27300	1025	1,292
12,5	47772	1812	1,44	26520	1006	1,303
15,5	46165	1773	1,46	25582	982	1,317
17,5	45366	1753	1,467	25120	971	1,324
20	44267	1725,5	1,478	24489	955	1,33
22,5	43228	1699	1,5	23898	940	1,342

(4.18) denkleminde, Çizelge 4.1' deki (c_{p0i}) değerlerinin ve Çizelge 5.4' deki (y_{mi}) değerlerinin yerine konulmasıyla karışımın molar özgül ısı (c_{p0}) elde edilir. Molar özgül ısının karışımın molekül kütlelerine bölünmesiyle de Şekil 5.3' de gösterilen, yakıt olarak doğalgaz kullanılan Cheng Çevriminde yanma odasına değişen miktarlarda buhar püskürtülmesi durumlarında yanma sonu karışım ürünlerinin özgül ısı değerlerinin sıcaklıkla değişimi grafiği elde edildi.

Şekil 5.3 İncelendiğinde, artan sıcaklıkla birlikte özgül ısıların her durum için arttığı fakat, karışımın özgül ısının buhar püskürtülmesi durumunda ve buhar miktarının daha çok olduğu durumda daha yüksek değerlerde olduğu görülmüştür.



Şekil 5.3 Yakıt olarak doğalgaz kullanılan Cheng Çevriminde yanma odasına değişen miktarlarda buhar püskürtülmesi durumlarında yanma sonu karışım ürünlerinin özgül ısı değerlerinin sıcaklıkla değişimi

Buna göre değişen buhar miktarlarına göre gaz türbini gücü değerleri Çizelge 5.12'de gösterilmiştir.

Çizelge 5.12 Enjekte edilen buhar miktarına göre türbin gücünün değerleri

$m_{b\&}$ (kg/s)	$m_{y\&}$ (kg/s)	Mysü (kg/kmol)	Wtürbin (kW)
0	103,5	28	88015
2,5	106	27,56	88837
5	108,5	27,23	89602
7,5	111	27	90316
10	113,5	26,64	90985
12,5	116	26,37	91615
15,5	119,272	26,04	92388
17,5	121	25,88	92775
20	123,5	25,65	93312
22,5	126	25,44	93825

Buna göre değişen buhar miktarlarına göre gaz türbini gücü değerleri Çizelge 5.12’de incelendiğinde artan buhar miktarlarıyla beraber türbin gücünün de arttığı görölmektedir. Bu duruma, türbinde genişleyerek iş yapan akışkanın debisindeki artışın sebep olduğu görölmüştür.

Tüm bunların sonucunda çevrimin net işi aşığıdaki gibi hesaplanır:

$$W_{NET} = W_{TÜR} - W_{KOMP} \quad (5.18)$$

Buna göre değişen buhar miktarlarına göre çevrim net gücü değerleri Çizelge 5.13’de gösterilmiştir.

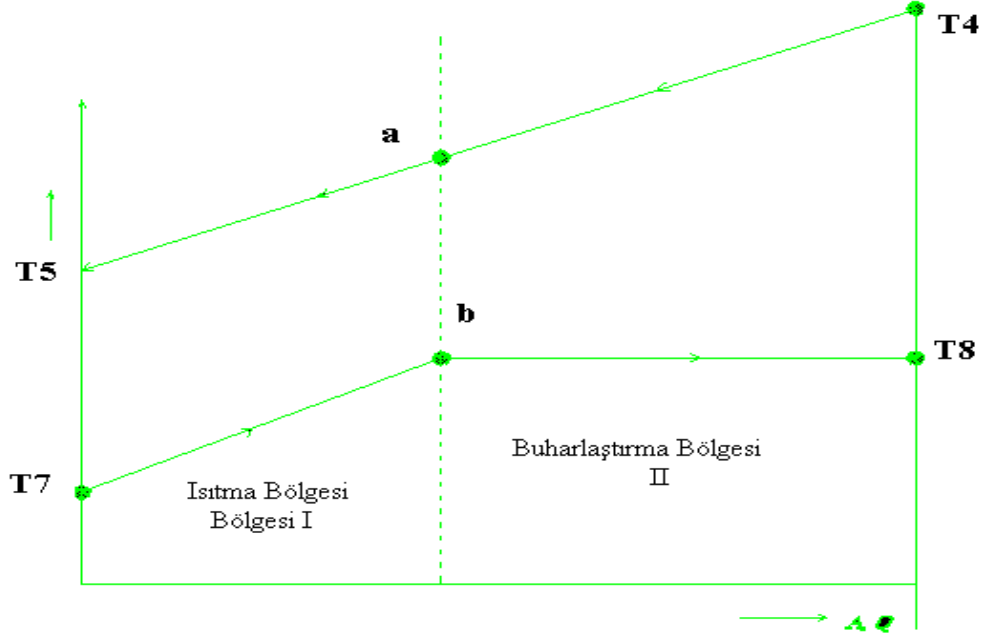
Çizelge 5.13 Değişen buhar miktarlarına göre çevrim net gücü değerleri

$m_{b,s}$ (kg/s)	Wnet (kW)
0	53250,83
2,5	54073,36
5	54837,84
7,5	55551,73
10	56221
12,5	56851
15,5	57624
17,5	58011
20	58548
22,5	59060,66

Çizelge 5.13 incelendiğinde, değişen buhar miktarlarına göre çevrim net gücü değerlerinin artan buhar miktarlarıyla beraber arttığı görülmektedir. Bunun sebebi olarak ise türbinde genişleyerek iş yapan akışkanın debisindeki artışa karşılık kompresör işinin değişmemesinin sebep olduğu görülmüştür.

5.2.5.3 Isı değiştiricisinde üretilen buharın hesaplanması

Isı değiştiricisindeki hesaplamalarla her birinde farklı oranlarda buharın püskürtüleceğinin düşünüldüğü Cheng Çevriminde üretebilen buhar miktarı bulunur ve sistemin sağlaması yapılır:



Şekil 5.4 Eşanjörde ısı transfer diyagramı

Eşanjör ısıtma bölgesinde;

$$m_{su} * Cp_{su} * (T_b - T_7) = m_{ysü} * (Cp_a * T_a - Cp_b * T_b) \quad (5.19a)$$

Eşanjör buharlaştırma bölgesinde;

$$m_{ysü} * (Cp_4 * T_4 - Cp_a * T_a) = m_{buhar} * (h_8 - h_b) \quad (5.19b)$$

şeklinde yazılır. Burada T_4 , gaz türbininden çıkan egzoz gazlarının sıcaklığı olup daha önce hesaplanmıştı. T_b , ısı değiştiricisinden çıkan egzoz gazlarının sıcaklığı olup 520 K olarak seçildi. Cp_4 , egzoz gazlarının özgül ısısı olup daha önce hesaplanmıştı. $m_{ysü}$ Yanma sonu ürünlerinin kütleli debisidir. h_8 Isı değiştiricisinden çıkan 500 K sıcaklığında ve 10 bardaki buharın entalpisi olup 3478,5 kJ/kg olarak seçildi. h_7 ($Cp_{su} * T_7$), Isı değiştiricisine 298 K'de giren suyun entalpisi olup 104,65 kJ/kg olarak seçildi, m_{buhar} ise ısı değiştiricisinde üretilen buharın kütleli debisini göstermektedir.

(5.19a) ve (5.19b) denklemlerinin her bir buhar püskürtme miktarındaki çevrim için ayrı ayrı çözülmesiyle, çevrimde üretilen buhar debileri aşağıdaki gibi bulunur:

Çizelge 5.14 Değişen buhar miktarlarına göre egzoz gazlarıyla üretilebilen buhar miktarları.

mbe(kg/s)	mbuhar(kg/s)
2,5	17,01
5	16,25
7,5	15,54
10	14,87
12,5	14,25
15,5	13,67
17,5	12,9
20	12,5
22,5	12,1

Buna göre 15,5 kg/s ve üzerindeki buhar püskürtme miktarlarında, sistemin kendi çevrimini tamamlayacak miktarda buhar üretmediği görülmüştür.



Şekil 5.5 Sabit Pr oranında yanma odasına püskürtülen buharın miktarlarına göre çevrim net gücü değerleri

Şekil 5.5 incelendiğinde, değişen buhar miktarlarına göre çevrim net gücü değerlerinin artan buhar miktarlarıyla beraber arttığı görülmektedir. Bunun sebebi olarak ise türbinde

genişleyerek iş yapan akışkanın debisindeki artışa karşılık kompresör işinin değişmemesinin sebep olduğu görülmüştür.

5.2.6 Çevrim Veriminin Hesaplanması

5.2.6.1 Cheng Çevriminin Enerji Verimi

$$\eta_I = \frac{W_{NET}}{m_{iy} \cdot LHV} \quad (5.20)$$

denklemlerle ifade edilebilir.

(5.20) eşitliğinde LHV yakıtın alt ısıl değerini, göstermektedir. Yakıtı meydana getiren bileşenlerin ısıl değerleri ve mol oranları Çizelge 5.15’de verilmiştir.

Çizelge 5.15 Yakıtı meydana getiren bileşenlerin ısıl değerleri ve mol oranları (Moran ve Shapiro,2000)

Madde	Mol Oranı (y _{n,i})	LHV (kJ/kmol)	Yakıtın ortalama mol kütlesi (kg/kmol)
CH_4	0,947	802470,86	16,8977
C_2H_6	0,0375	1427723,6	
C_3H_8	0,0089	2044336,92	
N_2	0,0066	0	

Yakıtın alt ısıl değeri,

$$LHV = \frac{\sum_{i=1}^4 y_{n,i} \cdot LHV_i}{M_y} \quad (5.21)$$

$$LHV = \frac{0,947 \cdot 802470,86 + 0,0375 \cdot 1427723,6 + 0,0089 \cdot 2044336,92}{16,8977}$$

= 49218,2 kJ/kg olarak bulunur.

Buna göre (5.20) denkleminin çözülmesiyle değişen su buharı miktarlarına göre çevrim verimi Çizelge 5.16’da gösterilmiştir.

5.2.6.2 Rejeneratörlü Çevrimin Enerji Verimi Hesabı

$$\eta_{I(rej)} = \frac{W_{NET}}{Q_{rej.}} * \eta_b \quad (5.22)$$

$$Q_{rej.} = [(m_{y\bar{u}} * h_3) - (m_h * h_5)] \quad (5.23)$$

$$m_{y.LHV} = [(m_{y\bar{u}} * h_3) - (m_h * C_{p_h} * T_2)] / \eta_b \quad (5.24)$$

(5.24) eşitliğinin çözümünden yanma verimi olan η_b bulunur:

$$3,5 * 49218,2 = [(103,5 * 1982) - (100 * 1,025 * 630,376)] / \eta_b \text{ ise}$$

$\eta_b = 0,82$ olarak bulunur.

$$h_5 = C_{p_h} * T_5 \quad (\text{kJ/kg}) \quad (5.25)$$

$$C_{p_h} = 1,025 \text{ kJ/kg-K,}$$

$$T_5 = T_2 + \eta_{rej.} * (T_4 - T_2) \quad (5.26)$$

$\eta_{rej.}$ = rejeneratör etkinliği olup 0,8 olarak alınmıştır.

$$T_5 = 630,376 + 0,8 * (899,2 - 630,376) \text{ ise,}$$

$$T_5 = 845,43 \text{ K olarak bulunur.}$$

T_5 değerinin (5.25) denkleminde yerine konulmasıyla h_5 ;

$$h_5 = 1,025 * 845,43 = 866,56 \text{ kJ/kg olarak bulunur.}$$

Bu değer (5.23) denkleminde yerine konulmasıyla $Q_{rej.}$;

$$Q_{rej.} = [103,5 * 1982] - [100 * 866,56]$$

$$= 118519 \text{ kW olarak bulunur.}$$

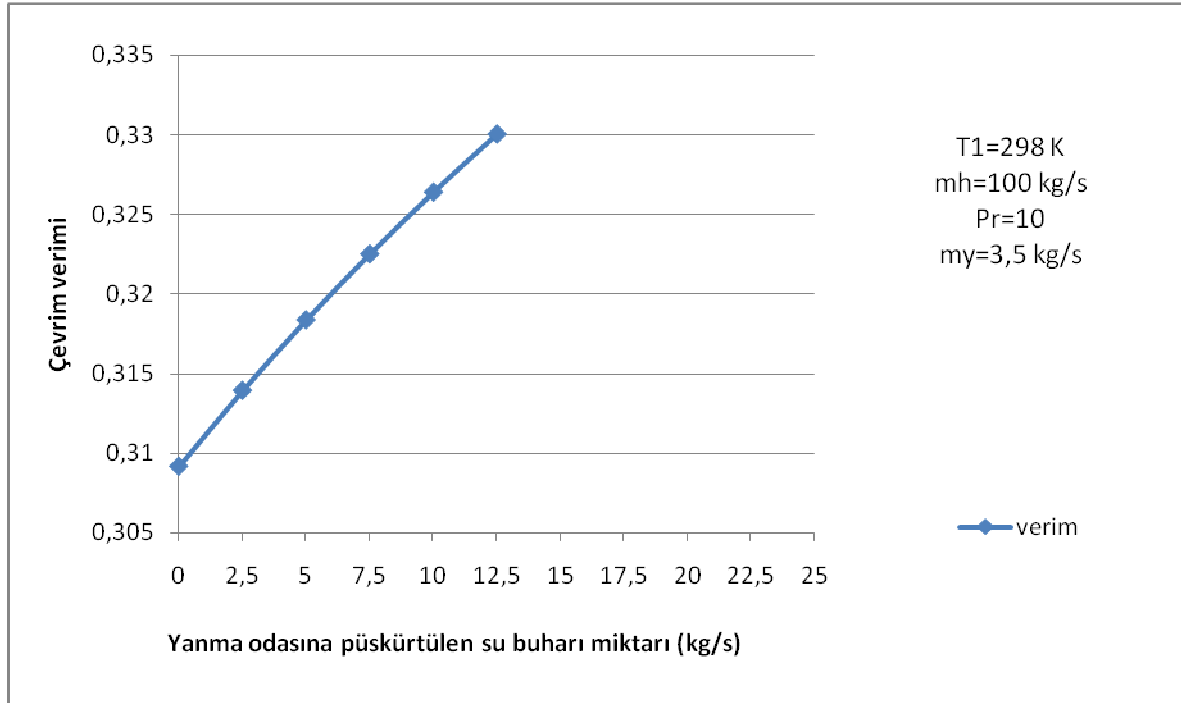
Bu değer (5.22) denkleminde yerine konulmasıyla $\eta_{I(rej)}$;

$$\eta_{I(rej)} = (53250,83 / 118516) * 0,82$$

$$= 0,368 \text{ olarak bulunur.}$$

Çizelge 5.16 Değişen su buharı miktarlarına göre çevrim verimi

$m_{b,s}$ (kg/s)	η_I
	Verim (Cheng & Basit Çevrim)
0	0,309
2,5	0,313
5	0,318
7,5	0,322
10	0,326
12,5	0,33
15,5	-
17,5	-
20	-
22,5	-
$\eta_{I REJ}$ (rejeneratörlü çevrim verimi)	0,368



Şekil 5.6 Yanma odasına püskürtülen su buharı miktarlarının değişimine göre çevrim verimi

Şekil 5.6'da artan buhar püskürtme miktarıyla beraber çevrim veriminin de arttığı görülmektedir. Sistem 12,5 kg/s'e kadar buhar üretebildiği için daha yüksek buhar püskürtme miktarları için çevrim verimi hesaplanamamıştır.

5.3 Farklı Basınç Oranlarında ve Sabit Türbin Giriş Sıcaklıklarında Yanma Odasına Değişen Miktarlarda Su Buharı Püskürtülmesinin Çevrim Performansına Etkisinin İncelenmesi

5.3.1 Çevrim Parametreleri Seçimi

Çizelge 5.17 Sabit türbin giriş sıcaklıklarında Cheng çevrimi için seçilen çalışma parametreleri

Kompresöre giren havanın sıcaklığı	298 [K]
Kompresöre giren havanın basıncı	1,01325 [bar]
Kompresöre giren havanın kütleli debisi, \dot{m}_h	100 [kg/s]
Yakıtın kütleli debisi, \dot{m}_y	Hesaplanacak [kg/s]
Bağıl nem, ϕ	% 75
Çevrimin basınç oranı, P_r	8, 10, 12, 14, 16, 18, 20, 22, 24
Yakıtın mol bileşimi, %	$CH_4: 94,7 + C_2H_6: 3,75 + C_3H_8: 0,89 + N_2: 0,66$
Isı değiştiricisi besleme suyu giriş sıcaklığı	298 [K]
Isı değiştiricisinde elde edilen buharın sıcaklığı	T_d [K]
Isı değiştiricisinde elde edilen buharın basıncı	Çevrim basıncında [bar]
Isı değiştiricisinde elde edilen buharın kütleli debisi	0 - 2,5 - 7,5 - 10 - 15,5 [kg/s]
Türbin giriş sıcaklığı, (T_3) (Sabit)	1100 (K), 1300 (K), 1400 (K)

5.3.2 Yapılan Kabuller

- Yanmanın tam yanma olduğu kabul edilmiştir.
- Kinetik ve potansiyel enerjiler ihmal edilmiştir.
- Gaz türbini ve kompresör politropik verimleri sırasıyla $\eta_{tp} = 0,86$ ve $\eta_{cp} = 0,85$ olarak alınmıştır.

- Gaz türbini ve kompresörün mekanik verimleri 0,98 olarak alınmıştır.
- Türbin giriş sıcaklığının sabit olduğu kabul edilmiştir.
- Basınç kayıpları kompresör çıkışı ve türbin girişi arasında % 8; türbin çıkışında % 5 olarak alınmıştır.

5.3.3 Kompresör Çıkış Sıcaklığının ve Kompresör Gücünün Bulunması

Politropik verimlere bağlı olarak izentropik verim değerinin denklemi aşağıdaki gibidir (Karamıklı, E.):

$$\eta_{cis} = \frac{r_c^\alpha - 1}{\alpha} \cdot r_c^{-\eta_{cp}} \quad (5.27)$$

olup, türbin ve kompresör politropik verim değerleri:

$$\eta_{tp} = 0,86$$

$$\eta_{cp} = 0,85$$

olarak kabul edilmiştir.

(5.27) denkleminin çözülmesiyle farklı basınç oranları için kompresör ve türbin izentropik verim değerleri Çizelge 5.18'deki gibi bulunur:

Çizelge 5.18 Basınç oranlarına bağlı olarak türbin ve kompresör izentropik verim değerleri

Pr	η_{cis}	η_{tis}
8	0,802	0,818
10	0,796	0,813
12	0,792	0,809
14	0,788	0,805
16	0,785	0,802
18	0,782	0,799
20	0,779	0,797
22	0,777	0,794
24	0,774	0,792

(5.27) ve (5.3) denkleminin çözülmesiyle;

$$T_2 = T_1 + \frac{T_1}{\eta_{cis}} \cdot \left[\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right]$$

farklı basınç oranları için kompresör çıkış sıcaklıkları bulunur (Çizelge 5.19).

(5.4) denkleminin çözülmesiyle;

$$P_K = m_h \cdot C_{p,oh} \cdot (T_2 - T_1) / \eta_m \text{ (kW)}$$

farklı basınç oranları için kompresör güçleri bulunur (Çizelge 5.19).

Çizelge 5.19 Farklı basınç oranları için kompresör çıkış sıcaklıkları ve kompresör güçleri

Pr	T_2 (K)	Wkomp (kW)
8	590,848	30629,5066
10	635,918	35343,42948
12	675,288	39461,20196
14	710,473	43141,35609
16	742,434	46484,15939
18	771,818	49557,52861
20	799,089	52409,84637
22	824,589	55076,94006
24	848,580	57586,16699

5.3.4 Türbin Giriş Entalpisi ve Yakıt Miktarlarının Bulunması

Enerjinin korunumu kanunundan hareketle yanma odasına giren maddelerin toplam enerjisi yanma odasından çıkan ürünlerin toplam enerjisine eşit olacaktır (Karamıklı, E):

$$m_h \cdot C_{ph} \cdot T_2 + m_y \cdot \text{LHV} \cdot \eta_b + m_{be} \cdot h_{buhar} = (m_h + m_y + m_{be}) \cdot h_{gkar} \quad (5.28)$$

Burada;

$$h_{3kar} = \text{Türbin giriş entalpisi} = h_3 = (T_3 \cdot \sum y_i \cdot c_{p,i}) / (M_{yeni}) \text{ (kJ/kg)}$$

$$m_h = 100 \text{ (kg/s)},$$

$$C_{p,h} = 1,025 \text{ kJ/kg-K},$$

$$T_2 = \text{Kompresör çıkış sıcaklığı (K) (Çizelge 5.19)}$$

$$m_y = \text{Yanma odasında yakılan yakıt miktarı (kg/s) (Çizelge 5.20, 5.21, 5.22)}$$

$$\text{LHV} = \text{Yakıtın alt ısı değeri} = 49218,2 \text{ (kJ/kg)}$$

$$m_{be} = \text{Yanma odasına püskürtülen su buharı miktarı (kg/s)},$$

(5.28) denkleminde yararlanılarak (her bir türbin giriş sıcaklığı değeri için: 1100, 1300, 1400 K) değişen mbe miktarları ve Pr oranlarına göre excel programı kullanılarak yanma odasına gönderilen yakıt miktarları (m_y), karışımın yanma odasından çıkış entalpisi (h_3) (Çizelge 5.28, 5.29, 5.30) bulunur.

Çizelge 5.20 $T_3=1100$ K için değişen mbe miktarları ve Pr oranlarına göre yanma odasına gönderilen yakıt miktarları (m_y)(kg/s)

Pr	myakıt- mbe(15,5)	myakıt- mbe(10)	myakıt- mbe(7,5)	myakıt- mbe(2,5)	myakıt- mbe(0)
8	1,54	1,623	1,574	1,596	1,603
10	1,44	1,511	1,47	1,496	1,503
12	1,345	1,418	1,388	1,41	1,423
14	1,268	1,333	1,306	1,328	1,34
16	1,2	1,26	1,24	1,26	1,272
18	1,14	1,227	1,175	1,2	1,21
20	1,08	1,165	1,12	1,14	1,151
22	1,02	1,106	1,06	1,085	1,1
24	0,97	1,05	1,01	1,035	1,05

Çizelge 5.21 $T_3=1300$ K için değişen mbe miktarları ve Pr oranlarına göre yanma odasına gönderilen yakıt miktarları (m_y)(kg/s)

Pr	myakıt-mbe(15,5)	myakıt-mbe(10)	myakıt-mbe(7,5)	myakıt-mbe(2,5)	myakıt-mbe(0)
8	2,462	2,4	2,374	2,321	2,296
10	2,354	2,291	2,262	2,215	2,187
12	2,252	2,194	2,17	2,115	2,089
14	2,17	2,107	2,082	2,03	2
16	2,09	2,028	2	1,95	1,928
18	2,017	1,955	1,93	1,88	1,857
20	1,95	1,89	1,87	1,818	1,79
22	1,887	1,829	1,803	1,752	1,728
24	1,831	1,77	1,745	1,696	1,67

Çizelge 5.22 $T_3=1400$ K için değişen mbe miktarları ve Pr oranlarına göre yanma odasına gönderilen yakıt miktarları (m_y)(kg/s)

Pr	myakıt-mbe(15,5)	myakıt-mbe(10)	myakıt-mbe(7,5)	myakıt-mbe(2,5)	myakıt-mbe(0)
8	2,96	2,853	2,804	2,706	2,665
10	2,845	2,737	2,69	2,6	2,553
12	2,743	2,64	2,593	2,5	2,453
14	2,656	2,56	2,505	2,417	2,367
16	2,575	2,473	2,428	2,334	2,289
18	2,504	2,4	2,356	2,262	2,218
20	2,434	2,331	2,288	2,195	2,149
22	2,37	2,27	2,223	2,135	2,09
24	2,315	2,21	2,166	2,074	2,03

5.3.5 Yanma Sonu Ürünlerinin Mol Kütlelerinin ve Kütleli Debilerinin Bulunması

(5.16) denkleminde;

$M_{y_{su}} = Y_{n,CO_2} \cdot M_{CO_2} + Y_{n,H_2O} \cdot M_{H_2O} + Y_{n,O_2} \cdot M_{O_2} + Y_{n,N_2} \cdot M_{N_2}$ denklemi kullanılarak değişen

basınç oranları ve buhar miktarları için excell programı yardımıyla $M_{y_{su}}$ değerleri hesaplanır

(Çizelge 5.26, 5.27, 5.28).

Çizelge5.23 $T_3=1100$ K için değişen basınç oranları ve buhar miktarları için yanma odasından çıkan karışım miktarları, mysü (kg/s)

Pr	mysü (mbe:15,5) kg/s	mysü (mbe:10) kg/s	mysü (mbe:7,5) kg/s	mysü (mbe:2,5) kg/s	mysü (mbe:0) kg/s
8	117,312	111,623	109,074	104,096	117,312
10	117,212	111,511	108,97	103,996	117,212
12	117,117	111,418	108,888	103,91	117,117
14	117,04	111,333	108,806	103,828	117,04
16	116,972	111,26	108,74	103,76	116,972
18	116,912	111,227	108,675	103,7	116,912
20	116,852	111,165	108,62	103,64	116,852
22	116,792	111,106	108,56	103,585	116,792
24	116,742	111,05	108,51	103,535	116,742

Çizelge5.24 $T_3=1300$ K için değişen basınç oranları ve buhar miktarları için yanma odasından çıkan karışım miktarları, mysü (kg/s)

Pr	mysü(mbe:15,5) kg/s	mysü(mbe:10) kg/s	mysü(mbe:7,5) kg/s	mysü(mbe:2,5) kg/s	mysü(mbe:0) kg/s
8	118,234	112,4	109,874	104,821	102,296
10	118,126	112,291	109,762	104,715	102,187
12	118,024	112,194	109,67	104,615	102,089
14	117,942	112,107	109,582	104,53	102
16	117,862	112,028	109,5	104,45	101,928
18	117,789	111,955	109,43	104,38	101,857
20	117,722	111,89	109,37	104,318	101,79
22	117,659	111,829	109,303	104,252	101,728
24	117,603	111,77	109,245	104,196	101,67

Çizelge 5.25 $T_3=1400$ K için değişen basınç oranları ve buhar miktarları için yanma odasından çıkan karışım miktarları, mysü (kg/s)

Pr	mysü(mbe:15,5) kg/s	mysü(mbe:10) kg/s	mysü(mbe:7,5) kg/s	mysü(mbe:2,5) kg/s	mysü(mbe:0) kg/s
8	118,732	112,853	110,304	105,206	102,665
10	118,617	112,737	110,19	105,1	102,553
12	118,515	112,64	110,093	105	102,453
14	118,428	112,56	110,005	104,917	102,367
16	118,347	112,473	109,928	104,834	102,289
18	118,276	112,4	109,856	104,762	102,218
20	118,206	112,331	109,788	104,695	102,149
22	118,142	112,27	109,723	104,635	102,09
24	118,087	112,21	109,666	104,574	102,03

Çizelge 5.26 $T_3=1100$ K için değişen basınç oranları ve buhar miktarları için yanma odasından çıkan karışımın mol kütlesi, Mysü (kg/kmol)

Pr	Mysü (mbe:15,5)	Mysü (mbe:10)	Mysü (mbe:7,5)	Mysü (mbe:2,5)	Mysü (mbe:0)
8	26,3	26,92	27,241	27,91	28,29
10	26,32	26,93	27,256	27,93	28,31
12	26,33	26,95	27,27	27,95	28,32
14	26,34	26,96	27,282	27,96	28,34
16	26,348	26,97	27,29	27,975	28,355
18	26,35	26,98	27,3	27,987	28,37
20	26,36	26,99	27,31	27,997	28,38
22	26,368	26,997	27,32	28,01	28,39
24	26,375	27	27,327	28,016	28,4

Çizelge 5.27 $T_3=1300$ K için değişen basınç oranları ve buhar miktarları için yanma odasından çıkan karışımın mol kütlesi, Mysü (kg/kmol)

Pr	Mysü (mbe:15,5)	Mysü (mbe:10)	Mysü (mbe:7,5)	Mysü (mbe:2,5)	Mysü (mbe:0)
8	26,187	26,801	27,115	27,784	28,157
10	26,2	26,817	27,13	27,802	28,177
12	26,211	26,83	27,14	27,818	28,194
14	26,22	26,85	27,157	27,831	28,21
16	26,23	26,86	27,166	27,846	28,22
18	26,23	26,87	27,175	27,855	28,235
20	26,242	26,88	27,184	27,866	28,247
22	26,25	26,89	27,193	27,876	28,257
24	26,256	26,9	27,2	27,885	28,267

Çizelge 5.28 $T_3=1400$ K için değişen basınç oranları ve buhar miktarları için yanma odasından çıkan karışımın mol kütlesi, Mysü (kg/kmol)

Pr	Mysü (mbe:15,5)	Mysü (mbe:10)	Mysü (mbe:7,5)	Mysü (mbe:2,5)	Mysü (mbe:0)
8	26,12	26,73	27,045	27,715	28,088
10	26,132	26,75	27,06	27,733	28,108
12	26,144	26,76	27,075	27,75	28,125
14	26,154	26,77	27,087	27,76	28,14
16	26,163	26,79	27,098	27,776	28,154
18	26,17	26,8	27,12	27,787	28,166
20	26,18	26,81	27,118	27,8	28,177
22	26,187	26,82	27,127	27,81	28,188
24	26,2	26,83	27,135	27,817	28,2

5.3.6 Türbin Giriş Entalpilerinin Bulunması

(5.28) denkleminin çözümünden yanma ürünlerinin türbin girişindeki entalpi değerleri bulunur:

Çizelge 5.29 $T_3=1100$ K için değişen mbe miktarları ve Pr oranlarına göre yanma odasından çıkan karışımın entalpi değerleri h_3

Pr	h3 mbe:15,5 (kj/kg)	h3 mbe:15,5 (kj/kmol)	h3 mbe:10 (kj/kg)	h3 mbe:10 kj/kmol)	h3 mbe:7,5 (kj/kg)	h3 mbe:2,5 (kj/kg)	h3 mbe:2,5 (kj/kmol)	h3 mbe:0 (kj/kg)
8	1519,1	39937	1466	39464,7	1439	1384,4	38624,7	1355
10	1516,41	39896	1462	39371,6	1436	1381,3	38579,7	1352
12	1513,85	39845	1460	39347	1433,4	1378,5	38515	1349,2
14	1511,77	39805	1457,7	39299,5	1431	1376	38472,9	1346,5
16	1509,9	3977	1455,5	39254,8	1429	1374	38431	1344
18	1508,3	39743	1454,7	39247,8	1427	1372	38388,5	1342
20	1506,7	39716	1452,8	39211,0	1425,4	1370	38346,3	1340
22	1505,05	39688,	1451	39172,6	1422,5	1368	38304	1338,6
24	1503,7	39652	1449,5	39136,5	1422	1366,6	38278	1337

Çizelge 5.30 $T_3=1300$ K için değişen mbe miktarları ve Pr oranlarına göre yanma odasından çıkan karışımın entalpi değerleri h_3

Pr	h3 mbe:15,5 (kj/kg)	h3 mbe:15,5 (kj/kmol)	h3 mbe:10 (kj/kg)	h3 mbe:10 kj/kmol)	h3 mbe:7, 5 (kj/kg)	h3 mbe:2,5 (kj/kg)	h3 mbe:2,5 (kj/kmol)	h3 mbe:0 (kj/kg)
8	1886,5	49402	1815,7	48662,5	1782,7	1710	47510,6	1674
10	1882,8	49329	1811,7	48584,3	1778,5	1706	47430,2	1670
12	1879	49250	1808	48508,6	1775	1703,8	47396,3	1665,6
14	1876,5	49202	1805	48464,2	1772	1700	47312,7	1662
16	1873,8	49149	1802	48401,7	1768,5	1697	47444,0	1659
18	1871	49076	1799	48339,1	1766	1694,4	47197,5	1656
20	1869	49046	1797	48303,3	1763	1692	47149,2	1653
22	1867	49008	1794	48240,6	1761	1689	47082,5	1650,6
24	1865	48967	1792,6	48220,9	1759	1687	47041,9	1648

Çizelge 5.31 $T_3=1400$ K için değişen mbe miktarları ve Pr oranlarına göre yanma odasından çıkan karışımın entalpi değerleri h_3

Pr	h3 mbe:15, 5 (kj/kg)	h3 mbe:15, 5 (kj/kmol)	h3 mbe:10 (kj/kg)	h3 mbe:10) (kj/kmol)	h3 mbe:7,5 (kj/kg)	h3 mbe:2,5 (kj/kg)	h3 mbe:2,5 (kj/kmol)	h3 mbe:0 (kj/kg)
8	2080	54329	2000,4	53470,6	1963	1884	52215	1841
10	2075,5	54237	1995,6	53382,3	1958,5	1879	52110,3	1836
12	2071,7	54162	1991,8	53300,5	1954,5	1874,5	52017,3	1831,5
14	2068,5	54099	1988,6	53234,8	1950,58	1870	51911,2	1827,6
16	2065	54026	1985,4	53188,8	1947,6	1867	51857,7	1824
18	2062,7	53981	1982,4	53128,3	1944,6	1864	51794,9	1820,7
20	2060	53931	1979	53057	1941,7	1861	51735,8	1817,5
22	2057,6	53882	1976,8	53018	1939	1858	51670,9	1814,8
24	2055,5	53854	1974,4	52973,2	1936,5	1855,5	51614,4	1812

5.3.7 Gaz Türbini Çıkış Sıcaklığının Bulunması

(5.14) eşitliğinin çözülmesiyle türbin çıkış sıcaklığı bulunur:

$$\frac{T_4}{T_3} = 1 - \eta_{tis} \left[1 - \left(\frac{P_4}{P_3} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]$$

Türbin basınç oranları ise, türbin çıkışındaki basınç kaybının % 5 olduğu kabul edilirse aşağıdaki çizelgedeki değerlerdeki gibi bulunur:

Çizelge 5.32 Türbin basınç oranları

Pr (P_2/P_1)	Prt (P_3/P_4)
8	7,00952381
10	8,761904762
12	10,51428571
14	12,266666667
16	14,01904762
18	15,77142857
20	17,52380952
22	19,27619048
24	21,02857143

Çizelge 5.33 $T_3=1100, 1300$ ve 1400 K türbin giriş sıcaklıklarında ve değişen basınç oranları için türbin çıkış sıcaklıkları $T_4(K)$

	$T_3=1100$ K	$T_3=1300$ K	$T_3=1400$ K
Pr	$T_4(K)$	$T_4(K)$	$T_4(K)$
8	722	853,4	919
10	693	819	882
12	671	793	854
14	653,6	772,5	831,9
16	639,3	755,5	813,7
18	627,3	741,4	798,4
20	617	729,2	785,3
22	608,09	718,6	773,9
24	600,2	709,3	763,9

(5.17) denkleminde;

$$h_4 = T_4 \cdot \sum y_{n,i} \cdot c_{p0,i}$$

kullanılarak farklı basınç oranlarında değişen buhar püskürtme miktarları için türbinden çıkış entalpi değerleri hesaplanır:

Çizelge 5.34 $T_3=1100$ K için değişen basınç oranları ve buhar miktarları için türbin çıkış entalpi değerleri, h_4 (kJ/kmol)

Pr	h4 mbe:15,5 (kJ/kmol)	h4 mbe:15,5 kJ/kg	h4 mbe: 10 (kJ/kmol)	h4 mbe:10 kJ/kg	h4 mbe:7,5 kJ/kg	h4 mbe:2,5 (kJ/kmol)	h4 mbe:2,5 kJ/kg	h4 mbe:0 kJ/kg
8	24125	917	23786	883	873	23517	843	826
10	22954	872	22741	844	830	22380	801	786
12	22074	838	21870	811	798	21526	770	755,5
14	21381	812	21183	785	772	20851	746	731
16	20818	790	20624	764	752	20302	709	712
18	20347	772	20164	747	734	19844	695	695
20	19946	756	19765	732	719	19451	682,5	681
22	19597	743	19419	719	703	19112	672	669
24	19292	731	19116	708	696	18814	843	658

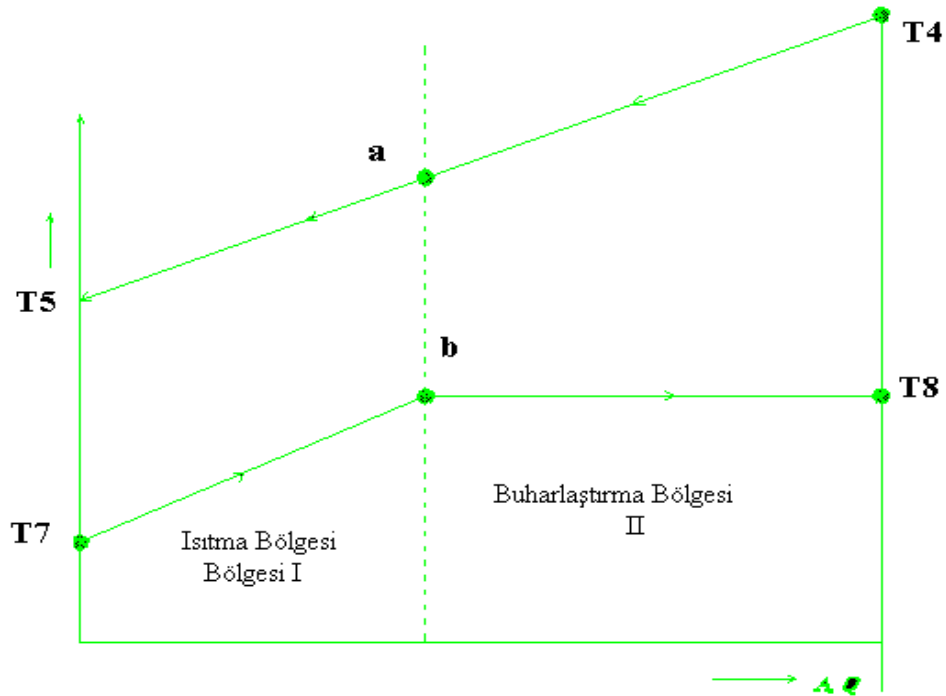
Çizelge 5.35 $T_3=1300$ K için farklı basınç oranlarında değişen buhar püskürtme miktarları için türbin çıkış entalpi değerleri, h_4

Pr	h4 mbe:15,5 (kJ/kmol)	h4 mbe:15,5 kJ/kg	h4 mbe: 10 (kJ/kmol)	h4 mbe:10 kJ/kg	h4 mbe:7,5 kJ/kg	h4 mbe:2,5 (kJ/kmol)	h4 mbe:2,5 kJ/kg	h4 mbe:0 kJ/kg
8	29726	1135	29438	1098,4	1079,9	28938,5	1041,5	1020,9
10	28295	1079,9	27992	1043,8	1026,3	27523,5	989,9	970
12	27190	1037	26903	1002,7	986	26455,3	951	932
14	26322	1003,8	26044	969,9	954	25613,4	920	902
16	25613	976,4	25343	943,5	928	24925,11	895	877,6
18	25020	953,8	24756	921,3	906	24350	874	856,8
20	24514	934,1	24257	902,4	887,8	23860	856	839
22	24075	917,1	23824	885,9	871,6	23432,2	840,5	823,9
24	23691	902,3	23443	871	857,5	23058,4	826,9	810,5

Çizelge 5.36 $T_3=1400$ K için farklı basınç oranlarında değişen buhar püskürtme miktarları için türbin çıkış entalpi değerleri, h_4 (kj/kmol)

Pr	h4 mbe:15,5 (kj/kmol)	h4 mbe:15,5 kj/kg	h4 mbe: 10 (kj/kmol)	h4 mbe:10 kj/kg	h4 mbe:7,5 kj/kg	h4 mbe:2,5 (kj/kmol)	h4 mbe:2,5 kj/kg	h4 mbe:0 kj/kg
8	32722	1252,7	32351,3	1210	1189	31772	1146	1123
10	31101	1190	30754	1149,6	1130	30215	1089	1067
12	29882	1142,9	29553	1104	1085,6	29039	1046	1025
14	28921,4	1105,8	28607	1068,6	1050	28112,2	1012	992
16	28137,2	1075	27831	1038,8	1021,6	27353	984,7	965
18	27482,1	1050	27183	1014	997	26718	961,5	942
20	26922	1028	26630	993	976,8	26176	941,5	922
22	26437	1009	26152	975	958,9	25706	924	905
24	26012,2	992,8	25730,5	959	943	25292	909	891

5.3.8 Isı Değiştiricisinde Üretilen Buhar Miktarının Bulunması



Şekil 5.7 Isı eşanjörü buharlaşma eğrisi

(5.19a) ve (5.19b) denklemlerinin çözülmesiyle, her bir buhar püskürtme oranındaki çevrim için ayrı ayrı çözülmesiyle her bir çevrimde farklı basınç oranlarında üretilen buhar debileri bulunur.

$$m_{\text{buhar}} = m_{\text{yfü}} * (h_4 - h_5) / (h_8 - h_b) + (h_b - h_7)$$

h_4 = Gaz türbininden çıkan egzoz gazlarının entalpisi (kj/kg)

T_5 = Isı değiştiricisinden çıkan egzoz gazlarının sıcaklığı olup 500 K olarak seçildi ($T_5 > T_7$ olacak şekilde seçildi, $T_7 = T_b$ = Çevrim basıncındaki buharın doyma sıcaklığı)

$m_{\text{yfü}}$ = Yanma sonu ürünlerinin kütleli debisi (kg/s)

h_8 = Isı değiştiricisinden çıkan buharın entalpisi olup çevrim basıncındaki doymuş buhar için bulundu (kj/kg)

h_7 = Isı değiştiricisine 298 K'de giren suyun entalpisi (kj/kg)

m_{buhar} = Isı değiştiricisinde üretilen buharın kütleli debisini göstermektedir (kg/s)

h_b = Çevrim basıncındaki doymuş buharın entalpisi (kj/kg)

h_5 = T_5 Sıcaklığındaki egzoz gazlarının entalpisi (kj/kg)

Buna göre üretilen buhar miktarları aşağıdaki çizelgedeki gibidir:

Çizelge 5.37 $T_3=1400$ K için değişen basınç oranlarında ve farklı buhar püskürtme oranlarındaki çevrimlerin üretebildikleri m_{buhar} değerleri

Pr	mbuhar mbe:15,5	mbuhar mbe:10	mbuhar mbe:7,5	mbuhar mbe:2,5
8	30,1	28,18	25,4	22,6
10	26,9	25,5	22,5	20,0
12	24,4	23,5	20,4	18,0
14	22,5	21,9	18,7	16,4
16	20,9	20,6	17,3	15,1
18	19,5	19,5	16,1	14,1
20	18,4	18,6	15,1	13,1
22	17,3	17,9	14,2	12,3
24	16,4	17,2	13,4	11,6

Sonuçlar incelendiğinde, $T_3=1400$ K için tüm buhar püskürtme miktarlarında ve basınç oranlarında sistemin çalıştığı ve çevrimin püskürtmek için gerekli miktarda buharı üretebildiği görüldü.

Çizelge 5.38 $T_3=1300$ K için değişen basınç oranlarında ve farklı buhar püskürtme oranlarındaki çevrimlerin üretebildikleri m_{buhar} değerleri

Pr	mbuhar mbe:15,5	mbuhar mbe:10	mbuhar mbe:7,5	mbuhar mbe:2,5
8	26	23,3	22,06	19,5
10	23	20,9	19,7	17,4
12	21,6	19	18	15,8
14	20	17,7	16,69	14,6
16	18,9	16,6	15,6	13,6
18	17,8	15,6	14,69	12,7
20	17	14,8	13,9	12,05
22	16	14,14	13,2	11,43
24	15,7	13,5	12,65	10,88

$T_3=1300$ K ve mbe=15,5 kg/s çevrimi için ise basınç oranının 22 değerine kadar sistem çalışmaktadır, bu basınç oranından daha yüksek bir değerde ise çevrim, püskürtmek için gerekli miktarda buharı üretememektedir.

Çizelge 5.39 $T_3=1100$ K için değişen basınç oranlarında ve farklı buhar püskürtme oranlarındaki çevrimlerin üretebildikleri m_{buhar} değerleri

Pr	mbuhar mbe:15,5	mbuhar mbe:10	mbuhar mbe:7,5	mbuhar mbe:2,5
8	16,4	14,18	13,4	11,6
10	14,35	12,49	11,6	9,9
12	-	11,08	10,2	8,7
14	-	9,98	9,2	7,7
16	-	-	8,3	6,9
18	-	-	7,6	6,3
20	-	-	7,04	5,7
22	-	-		5,2
24	-	-		4,8

Buna göre $T_3=1100$ K için; $m_{be}=15,5$ kg/s buhar püskürtülen çevrimde basınç oranının 8 değerine kadar, $m_{be}=10$ kg/s buhar püskürtülen çevrimde basınç oranının 12 değerine kadar ve $m_{be}=7,5$ kg/s buhar püskürtülen çevrimde ise basınç oranının 18 değerine kadar gerekli buhar miktarı üretilmektedir. Yeterli buhar üretilmemesi, artan buhar püskürtme miktarlarında türbin çıkış sıcaklıklarının azalması nedeniyle olmaktadır.

5.3.9 Çevrimin Net Gücünün Hesaplanması

(5.15) eşitliği ve (5.18) eşitliği;

$$W_{t\ddot{u}r} = \frac{m_{y\ddot{u}su}}{M_{y\ddot{u}su}} \cdot \eta_m \cdot (h_3 - h_4) \quad (\text{kW})$$

$$W_{NET} = W_{t\ddot{u}r} - W_{KOMP}$$

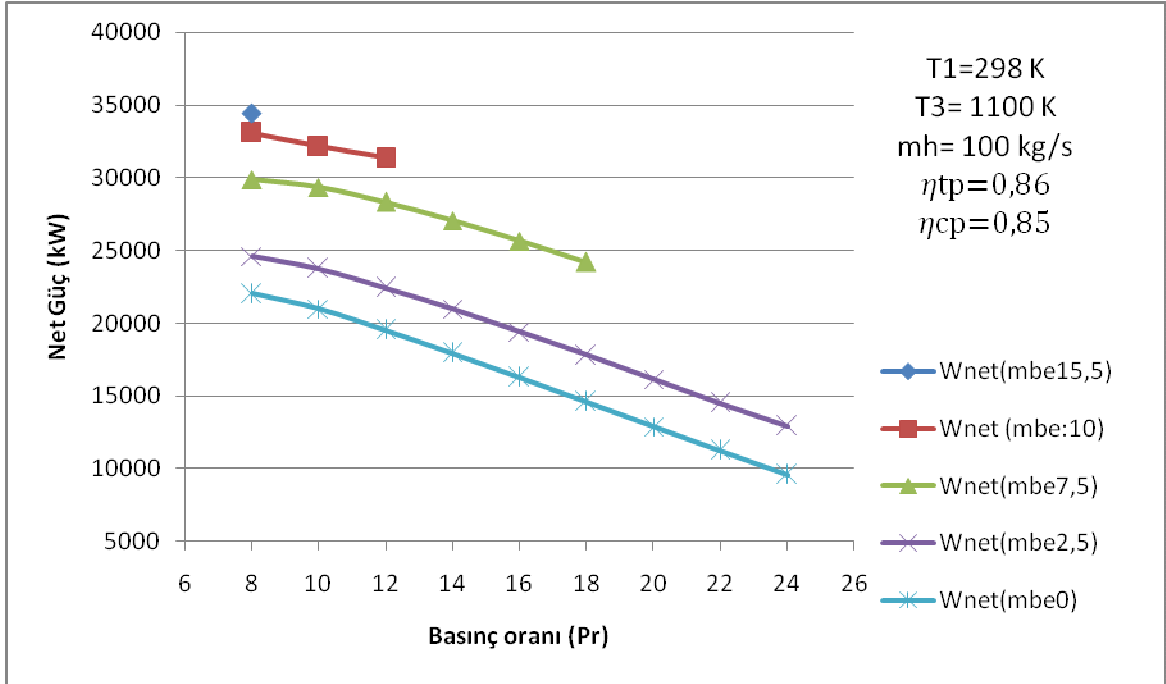
denklemlerinin çözülmesiyle türbin gücü ve çevrim net gücü değerleri bulunur.

Çizelge 5.40 $T_3=1100$ K için farklı basınç oranlarında değişen buhar püskürtme miktarları için türbin gücü değerleri, $W_{t\ddot{u}rbin}$ (kW)

Pr	Wtürbin (mbe15,5)	Wtürbin (mbe10)	Wtürbin (mbe7,5)	Wtürbin (mbe2,5)	Wtürbin (mbe0)
8	66323,94185	63711,13103	60500,34196	55240,29524	52650,29031
10	-	67486,50192	64705,3063	59112,45394	56325,0853
12	-	70809,17767	67793,82187	61920,18545	59002,67668
14	-	-	70188,69817	64129,46372	61090,61913
16	-	-	72127,29621	65907,09219	62750,98703
18	-	-	73735,30321	67355,59166	64145,76782
20	-	-	-	68565,29883	65293,13445
22	-	-	-	69580,1162	66321,37536
24	-	-	-	70508,69038	67185,5974

Çizelge 5.41 $T_3=1100$ K için farklı basınç oranlarında değişen buhar püskürtme miktarları için net güç değerleri, W_{net} (kW)

Pr	$W_{net}(mbe15,5)$	$W_{net}(mbe10)$	$W_{net}(mbe7,5)$	$W_{net}(mbe2,5)$	$W_{net}(mbe0)$
8	34391,052	33081,62443	29870,83536	24610,78865	22020,78371
10	-	32143,07244	29361,87682	23769,02446	20981,65583
12	-	31347,97571	28332,6199	22458,98348	19541,47472
14	-	-	27047,34208	20988,10763	17949,26304
16	-	-	25643,13683	19422,9328	16266,82765
18	-	-	24177,7746	17798,06305	14588,23921
20	-	-	-	16155,45246	12883,28808
22	-	-	-	14503,17614	11244,43531
24	-	-	-	12922,52339	9599,43041



Şekil 5.8 $T_3=1100$ K için farklı basınç oranlarında değişen buhar püskürtme miktarları için net güç değerleri, W_{net} (kW)

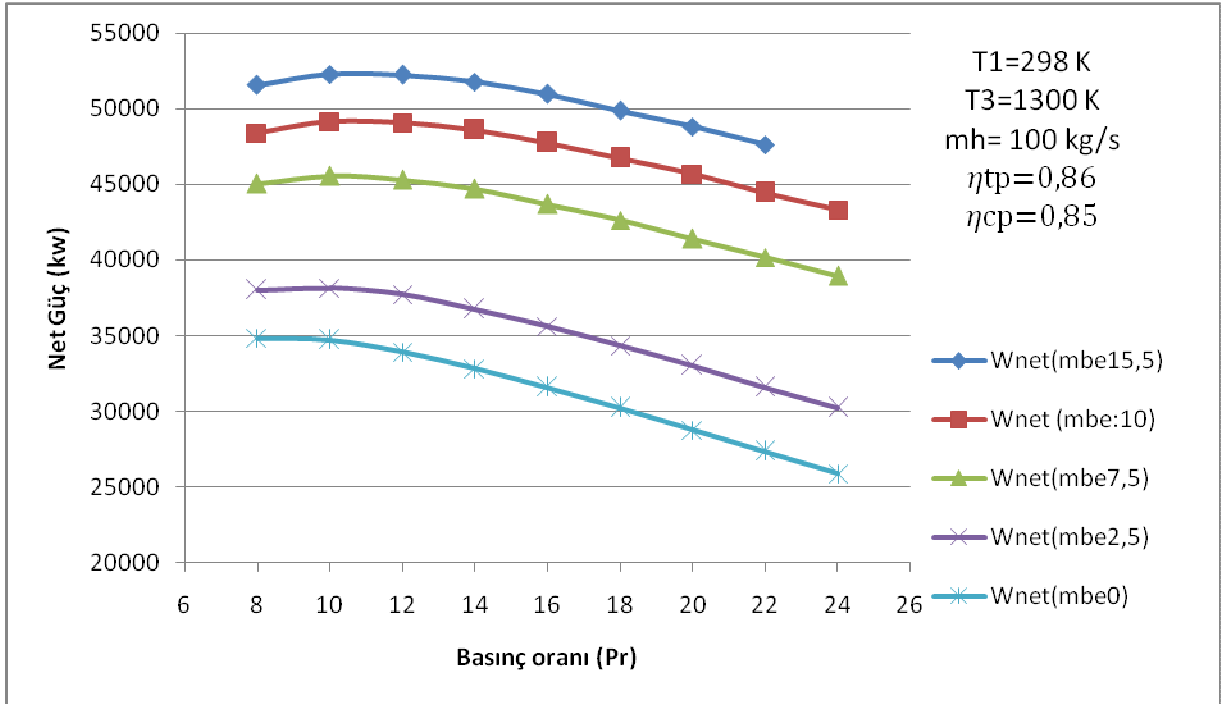
Şekil 5.8 İncelendiğinde, sabit türbin giriş sıcaklığı için basınç oranlarının artmasıyla net güç düşmeye başlamıştır. Buhar miktarlarının artmasıyla da net güç, artan buhar miktarıyla beraber daha az olan buhar miktarındaki güçle kıyaslandığında her basınç oranı için artmıştır.

Çizelge 5.42 $T_3=1300$ K için farklı basınç oranlarında değişen buhar püskürtme miktarları için türbin gücü değerleri, $W_{\text{türbin}}$ (kW)

Pr	$W_{\text{türbin}}$ (mbe15,5)	$W_{\text{türbin}}$ (mbe10)	$W_{\text{türbin}}$ (mbe7,5)	$W_{\text{türbin}}$ (mbe2,5)	$W_{\text{türbin}}$ (mbe0)
8	83505,74339	79012,92722	75667,46749	68665,96895	65467,92007
10	89145,89774	84501,9891	80905,84491	73478,19294	70062,57323
12	93374,72457	88540,54084	84779,3954	77177,68071	73371,9584
14	96742,30874	91739,204	87832,57332	79870,0468	75966,83613
16	99414,63141	94250,10568	90182,39413	82778,76945	78053,15534
18	101546,1987	96294,91376	92186,3649	83903,3149	79767,71703
20	103449,1165	98092,86741	93802,09202	85441,05616	81176,02116
22	105053,6871	99512,11817	95267,1231	86679,78881	82412,48237
24	-	100893,7452	96516,64817	87825,52524	83447,07477

Çizelge 5.43 $T_3=1300$ K için farklı basınç oranlarında değişen buhar püskürtme miktarları için net güç değerleri, W_{net} (kW)

Pr	W_{net} (mbe15,7)	W_{net} (mbe10)	W_{net} (mbe7,5)	W_{net} (mbe2,5)	W_{net} (mbe0)
8	51572,85	48383,4	45037,96	38036,46	34838,41
10	52298,49	49158,55	45562,41	38134,76	34719,14
12	52234,32	49079,3	45318,19	37716,47	33910,7
14	51765,15	48597,8	44691,21	36728,69	32825,48
16	50952,42	47765,94	43698,23	36294,61	31568,99
18	49879,83	46737,38	42628,83	34345,78	30210,18
20	48809,06	45683,02	41392,24	33031,209	28766,17
22	47633,04	44435,1	40190,1	31602,8	27335,54
24	-	43307,57	38930,48	30239,35	25860,90



Şekil 5.9 $T_3=1300\text{ K}$ için farklı basınç oranlarında değişen buhar püskürtme miktarları için net güç değerleri, W_{net} (kW)

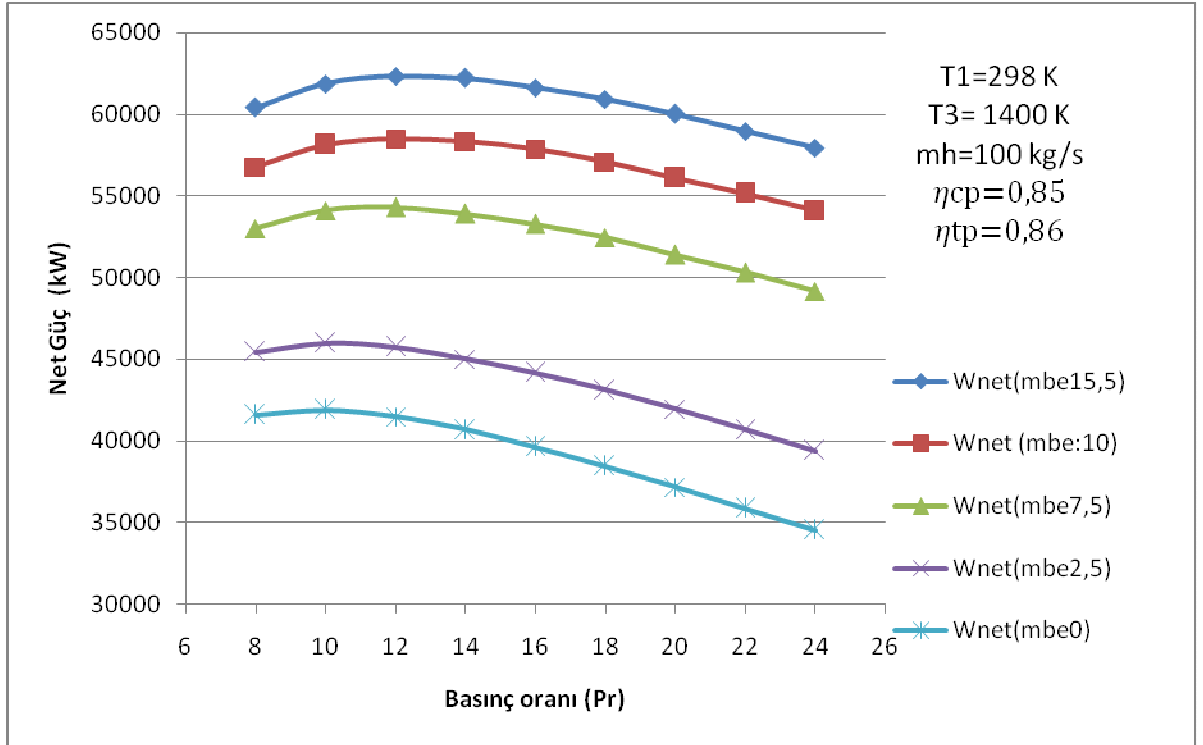
Şekil 5.9 İncelendiğinde, sabit türbin giriş sıcaklığı için basınç oranlarının artmasıyla net güçte önce bir artış meydana gelmiş, gücü maksimum yapan basınç oranından sonra da net güç düşmeye başlamıştır. Buhar miktarlarının artmasıyla da net güç, artan buhar miktarıyla beraber daha az olan buhar miktarındaki güçle kıyaslandığında her basınç oranı için artmıştır.

Çizelge 5.44 $T_3=1400\text{ K}$ için farklı basınç oranlarında değişen buhar püskürtme miktarları için türbin gücü değerleri, $W_{türbin}$ (kW)

Pr	$W_{türbin}(mbe15,5)$	$W_{türbin}(mbe10)$	$W_{türbin}(mbe7,5)$	$W_{türbin}(mbe2,5)$	$W_{türbin}(mbe0)$
8	92327,05779	87381,93081	83607,85559	76049,71744	72202,74999
10	98716,50644	93458,90557	89433,84361	81317,30539	77229,26912
12	103463,5103	97960,67034	93743,10483	85206,29865	80929,81492
14	107168,6916	101481,7143	97047,73434	88147,74097	83805,28997
16	110082,8	104331,2339	99758,32334	90637,84048	86107,53737
18	112576,1248	106639,1376	102012,1559	92653,79693	87995,44814
20	114631,2483	108511,7049	103811,2389	94333,22287	89571,02226
22	116389,9638	110212,3884	105385,0765	95739,25813	90937,39095
24	117958,0328	111657,1011	106747,5909	96976,32176	92099,81085

Çizelge 5.45 $T_3=1400$ K için farklı basınç oranlarında değişen buhar püskürtme miktarları için net güç değerleri, W_{net} (kW)

Pr	W_{net} (mbe15,5)	W_{net} (mbe10)	W_{net} (mbe7,5)	W_{net} (mbe2,5)	W_{net} (mbe0)
8	60394,16793	56752,42421	52978,34899	45420,21085	41573,2434
10	61869,10124	58115,47609	54090,41413	45973,87591	41885,83964
12	62323,10824	58499,46838	54281,90287	45745,09668	41468,61295
14	62191,53312	58340,35819	53906,37824	45006,38488	40663,93388
16	61620,59127	57847,07456	53274,16395	44153,6811	39623,37799
18	60909,7652	57081,60903	52454,62726	43096,26832	38437,91954
20	59991,19569	56101,85857	51401,39251	41923,3765	37161,17589
22	58969,32415	55135,44839	50308,1364	40662,31808	35860,4509
24	57921,39059	54070,93406	49161,42393	39390,15477	34513,64386



Şekil 5.10 $T_3=1400$ K için farklı basınç oranlarında değişen buhar püskürtme miktarları için net güç değerleri, W_{net} (kW)

Şekil 5.10 İncelendiğinde, sabit türbin giriş sıcaklığı için basınç oranlarının artmasıyla net güçte önce bir artış meydana gelmiş, gücü maksimum yapan basınç oranından sonra da net güç düşmeye başlamıştır. Buhar miktarlarının artmasıyla da net güç, artan buhar miktarıyla beraber daha az olan buhar miktarındaki güçle kıyaslandığında her basınç oranı için artmıştır.

5.3.10 Çevrim Veriminin Bulunması

5.3.10.1 Cheng Çevrimi Verimi

(5.20) eşitliğinden;

$$\eta_I = \frac{W_{NET}}{m_y \cdot LHV}$$

denkleminin çözülmesiyle verim değerleri bulunur.

5.3.10.2 Rejeneratörlü Çevrim Verimi

(5.22) denkleminde;

$$\eta_{I(rej)} = \frac{W_{NET}}{Q_{rej}} \cdot \eta_b$$

(5.23) denkleminde;

$$Q_{rej} = [(m_{y\bar{u}} \cdot h_3) - (m_h \cdot h_5)]$$

(5.24) denkleminde;

$$\eta_b = (m_y \cdot LHV) / [(m_{y\bar{u}} \cdot h_3) - (m_h \cdot C_{ph} \cdot T_2)]$$

denkleminin her bir $T_3 = 1100, 1300$ ve 1400 K sıcaklığı için çözülmesiyle yanma verimi:

$\eta_b = 0,99$ olarak bulunur.

(5.25) denkleminde;

$$h_5 = C_{ph} \cdot T_5 \quad (\text{kJ/kg})$$

$$C_{ph} = 1,025 \text{ kJ/kg-K,}$$

(5.26) denkleminde;

$$T_5 = T_2 + \eta_{rej} \cdot (T_4 - T_2)$$

$\eta_{rej.}$ = rejeneratör etkinliği olup 0,8 olarak alınmıştır.

Çizelge 5.46 $T_3 = 1100, 1300$ ve 1400 K türbin giriş sıcaklıklarındaki rejeneratörlü çevrim için yanma odasına gidecek havanın rejeneratörden çıkış sıcaklıkları

Pr	T5 (rejeneratörlü) T3=1400 K	T5 (rejeneratörlü) T3=1300 K	T5 (rejeneratörlü) T3= 1100 K
8	853,43	800,91	695,87
10	832,88	782,48	681,66
12	818,36	769,55	671,94
14	807,63	760,09	665,01
16	799,45	752,96	659,96
18	793,09	747,47	656,22
20	788,07	743,19	653,447
22	784,06	739,84	651,39
24	780,84	737,19	649,89

Buna göre $T_3 = 1100$ K çevrim için basınç oranının 10 değerine kadar; $T_3 = 1300$ K çevrimi için basınç oranının 16 değerine kadar; $T_3 = 1400$ K çevrimi için ise basınç oranının 18 değerine kadar rejeneratörlü çevrim kullanabiliriz.

Bu T_5 değerlerinin (5.25) denkleminde yerine konulmasıyla h_5 kJ/kg olarak bulunur:

Çizelge 5.47 $T_3 = 1100, 1300$ ve 1400 K türbin giriş sıcaklıklarındaki rejeneratörlü çevrim için yanma odasına gidecek havanın rejeneratörden çıkış entalpileri

Pr	h_5 (kJ/kg) $T_3 = 1100$ K	h_5 (kJ/kg) $T_3 = 1300$ K	h_5 (kJ/kg) $T_3 = 1400$ K
8	713,2734568	820,9370248	874,7688088
10	698,7077082	802,0430876	853,7107773
12	-	788,7972246	838,8251683
14	-	779,0973719	827,8243191
16	-	771,7842545	819,4446624
18	-	-	812,9247837
20	-	-	-
22	-	-	-
24	-	-	-

Bu h_5 değerlerinin (5.23) denkleminde yerine konulmasıyla $Q_{rej,i}$:

Çizelge 5.48 $T_3 = 1100, 1300$ ve 1400 K türbin giriş sıcaklıklarındaki rejeneratörlü çevrimlerde yanma ürünlerinin rejeneratörde verdiği ısı enerjileri

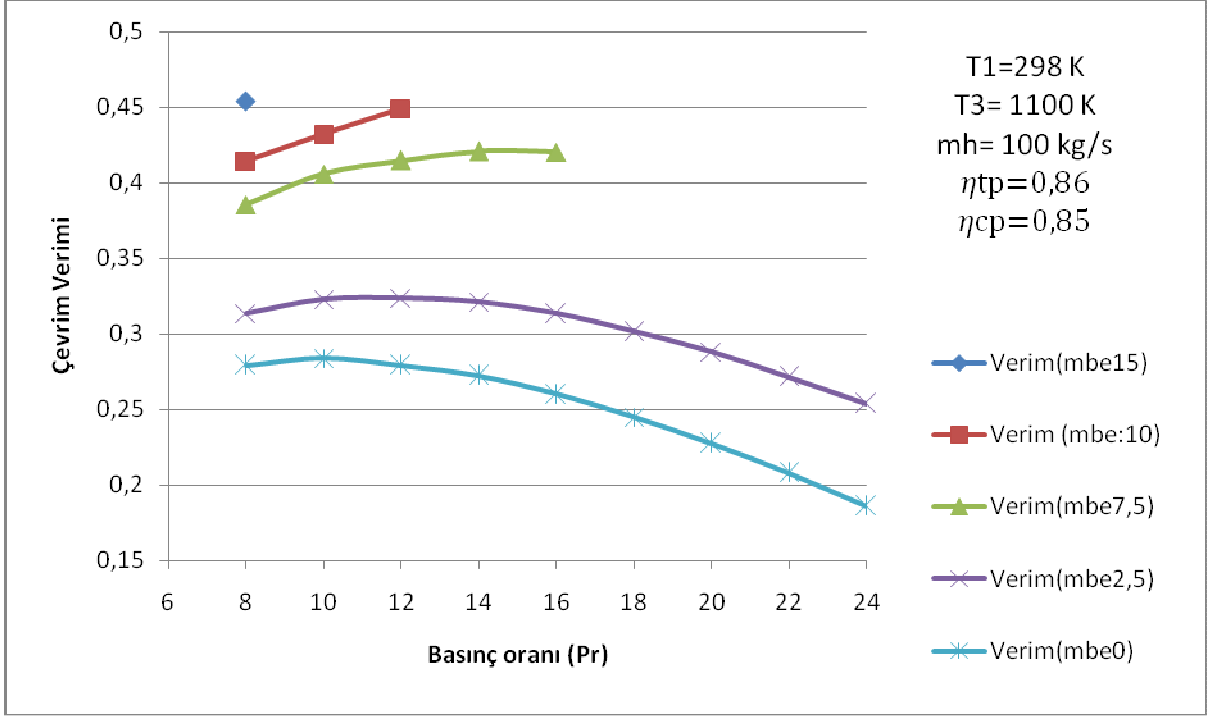
Pr	Qrejeneratör(kw) $T_3 = 1100$ K	Qrejeneratör(kw) $T_3 = 1300$ K	Qrejeneratör(kw) $T_3 = 1400$ K
8	66344,71932	89149,80152	101529,3841
10	67361,28518	90447,98124	102916,2303
12	-	91159,71594	103760,1527
14	-	91614,26281	104303,4973
16	-	91920,12655	104630,6698
18	-	-	104815,8342
20	-	-	-
22	-	-	-
24	-	-	-

Bu $Q_{rej,i}$ değerlerinin (5.22) denkleminde yerine konulmasıyla $\eta_{I(rej,i)}$:

$\eta_{I(rej,i)}$ = Çizelge 5.47, 5.48 ve 5.49'daki gibi bulunur.

Çizelge 5.49 $T_3 = 1100$ K için farklı basınç oranlarında değişen buhar püskürtme miktarları için verim değerleri

Pr	Verim (mbe15,5)	Verim (mbe10)	Verim (mbe7,5)	Verim (mbe2,5)	Verim (mbe0)	Verim (rejeneratörlü)
8	0,45	0,41	0,385	0,313	0,279	0,331
10	-	0,43	0,405	0,322	0,283	0,311
12	-	0,449	0,414	0,323	0,279	-
14	-	-	0,420	0,321	0,272	-
16	-	-	0,420	0,313	0,259	-
18	-	-	-	0,301	0,244	-
20	-	-	-	0,287	0,227	-
22	-	-	-	0,271	0,207	-
24	-	-	-	0,253	0,185	-



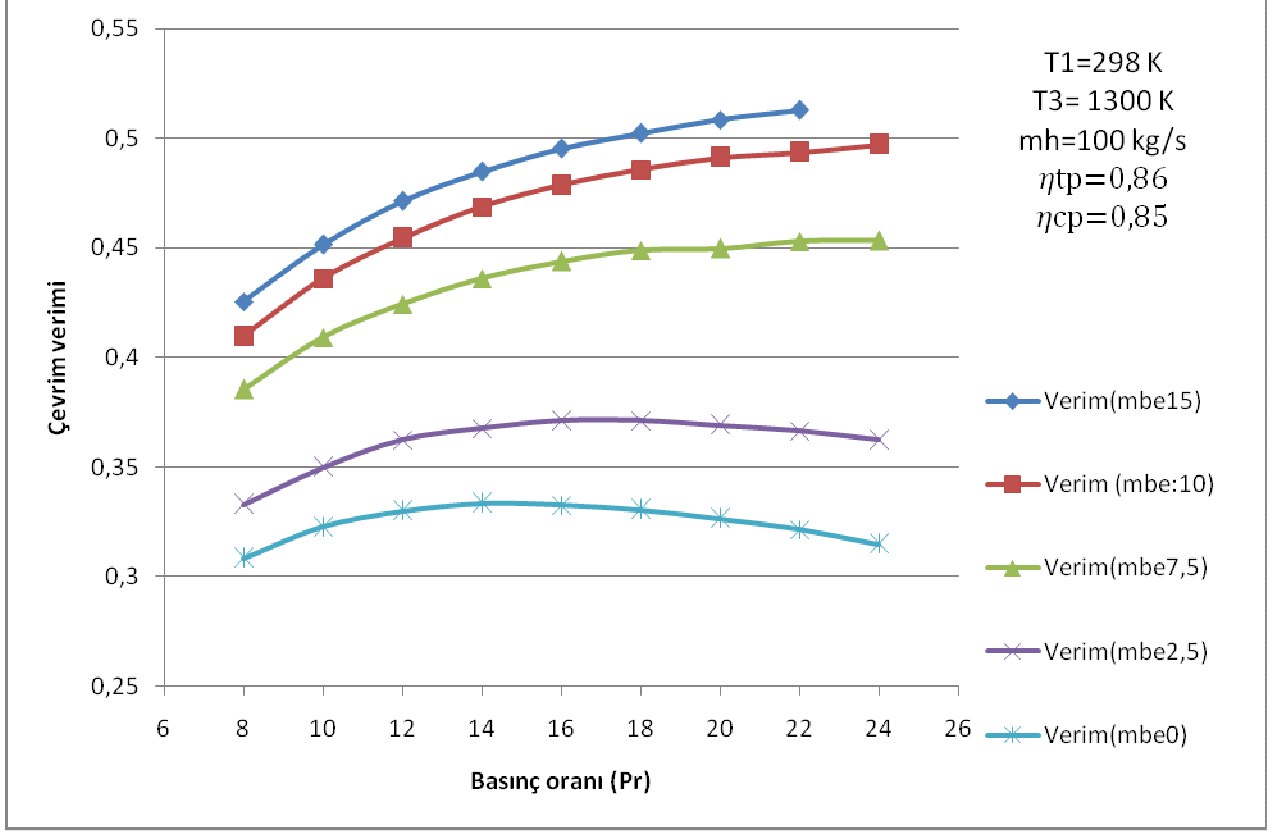
Şekil 5.11 $T_3=1100\text{ K}$ için farklı basınç oranlarında değişen buhar püskürtme miktarları için verim değerleri

Şekil 5.11 İncelendiğinde, artan türbin giriş sıcaklığıyla birlikte verimi ve net gücü maksimum yapan basınç oranlarının da daha yüksek değerlerde olduğu görülmektedir.

Grafik incelendiğinde her çevrim için, gücü maksimum yapan basınç oranının, verimi maksimum yapan basınç oranından daha düşük olduğu görülmektedir.

Çizelge 5.50 $T_3=1300\text{ K}$ için farklı basınç oranlarında değişen buhar püskürtme miktarları için verim değerleri

Pr	Verim (mbe15,5)	Verim (mbe10)	Verim (mbe7,5)	Verim (mbe2,5)	Verim (mbe0)	Verim (rejeneratörlü)
8	0,425	0,409	0,385	0,332	0,308	0,39
10	0,451	0,435	0,409	0,349	0,322	0,383
12	0,471	0,454	0,424	0,362	0,329	0,371
14	0,484	0,468	0,436	0,367	0,333	0,358
16	0,495	0,478	0,443	0,378	0,332	0,343
18	0,502	0,485	0,448	0,371	0,330	-
20	0,508	0,491	0,449	0,369	0,326	-
22	0,512	0,493	0,452	0,366	0,321	-
24	-	0,497	0,453	0,362	0,314	-



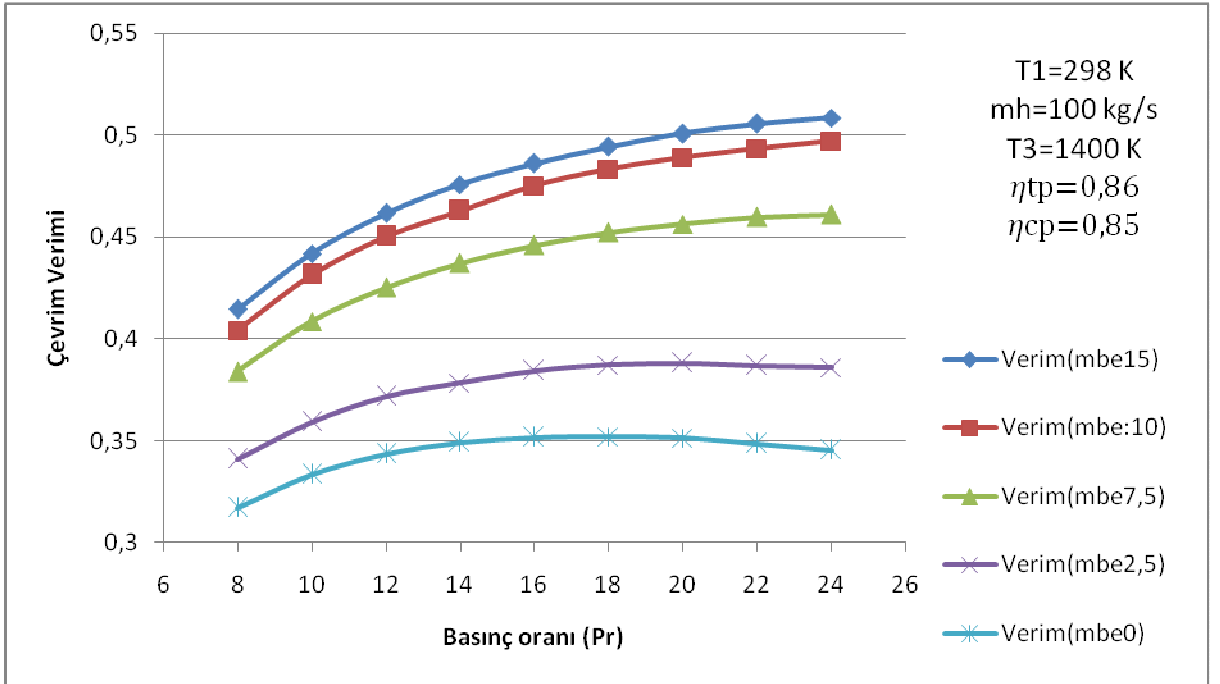
Şekil 5.12 $T_3=1300\text{ K}$ için farklı basınç oranlarında değişen buhar püskürtme miktarları için verim değerleri

Şekil 5.12 incelendiğinde, artan türbin giriş sıcaklığıyla birlikte verimi ve net gücü maksimum yapan basınç oranlarının da daha yüksek değerlerde olduğu görülmektedir.

Grafik incelendiğinde her çevrim için, gücü maksimum yapan basınç oranının, verimi maksimum yapan basınç oranından daha düşük olduğu görülmektedir.

Çizelge 5.51 $T_3=1400$ K için farklı basınç oranlarında değişen buhar püskürtme miktarları için verim değerleri

Pr	Verim (mbe15,5)	Verim (mbe10)	Verim (mbe7,5)	Verim (mbe2,5)	Verim (mbe0)	Verim (rejeneratörlü)
8	0,414	0,404	0,3839	0,341032389	0,316	0,409
10	0,44	0,431	0,408	0,359	0,333	0,406
12	0,46	0,450	0,425	0,371	0,343	0,39
14	0,475	0,463	0,437	0,378	0,349	0,38
16	0,48	0,475	0,445	0,384	0,351	0,378
18	0,49	0,483	0,452	0,387	0,352	0,366
20	0,50	0,489	0,456	0,388	0,351	-
22	0,5055	0,493	0,459	0,386	0,348	-
24	0,508	0,497	0,461	0,385	0,345	-



Şekil 5.13 $T_3=1400$ K için farklı basınç oranlarında değişen buhar püskürtme miktarları için verim değerleri

Şekil 5.8, 5.9, 5.10, 5.11, 5.12 ve 5.13 incelendiğinde, artan türbin giriş sıcaklığıyla birlikte verimi ve net gücü maksimum yapan basınç oranlarının da daha yüksek değerlerde olduğu görülmektedir.

Grafikler incelendiğinde her çevrim için, gücü maksimum yapan basınç oranının, verimi maksimum yapan basınç oranından daha düşük olduğu görülmektedir.

SONUÇ

Cheng çevriminde, sabit hava kompresör giriş sıcaklığında, sabit sıkıştırma oranında ve sabit yakıt miktarlarında egzoz gazlarının enerjisiyle üretilen buharın çevrimin hava miktarının % 0, % 2,5, % 5, %7,5, %10, %12,5, % 15,5, %17,5, %20 ve % 22,5'i oranlarında yanma odasına püskürtülmesi sonucu çevrimin performansı incelendiğinde, artan buhar yüzdesiyle birlikte çevrimin adyabatik alev sıcaklığının azaldığı, çevrimin net gücünün ve termik veriminin ise buhar miktarıyla birlikte orantılı olarak arttığı görülmüştür.

Yanma odasına buhar püskürtülmesinden dolayı türbine gönderilen gazların kütleli debisinin artması, buhar enjeksiyonlu çevrimin net gücünün artmasına neden olmaktadır.

Türbinden çıkan egzoz gazlarının atmosfere atılmayarak, yanma odasına enjekte edilen buharın elde edilmesinde kullanılmasıyla çevrim veriminde önemli artışlar elde edilmiştir.

Çizelge 5.1'de Cheng çevrimi için seçilen çalışma parametreleri için yapılan hesaplamalar sonucunda ısı eşanjöründe en çok % 15,5 oranına kadar buharın elde edilebileceği, % 15,5 ve üzerindeki değerler için gerekli buharı çevrimin üretemediği görülmüştür.

Aynı basınç oranlarında, türbin giriş sıcaklık değerlerinin artırılması durumunda basit çevrim ve rejeneratörlü çevrim verimlerinin arttığı görülmektedir. Buhar enjeksiyonlu çevrimlerde ise, aynı basınç oranında ve aynı buhar enjeksiyon miktarlarında (enjeksiyon miktarlarının 2,5 kg/s'den daha büyük değerleri için), türbin giriş sıcaklığının yüksek değerlerindeki verimlerin daha düşük türbin giriş sıcaklık değerlerindeki çevrim verimlerinden daha düşük olduğu görülmüştür.

Buhar enjeksiyonlu çevrimlerde, çevrimin verimini ve net gücünü maksimum yapan basınç oranlarının basit çevrime göre daha yüksek değerlerde olduğu görülmektedir.

Buhar enjeksiyonlu çevrimlerde, aynı türbin giriş sıcaklık değeri için, yanma odasına enjekte edilen buhar miktarı artırıldığında, çevrimin gücünü ve verimini maksimum yapan basınç oranlarının da arttığı görülmektedir.

Cheng çevriminde, püskürtülen buhar miktarının artırılması durumunda yanma odasından çıkan karışımın sıcaklığı azaldığından, aynı türbin giriş sıcaklığını elde edebilmek için basit çevrime göre yanma odasına gönderilen yakıt miktarı da artmaktadır.

Türbinden çıkan egzoz gazları ısısı kullanılarak elde edilen buharın yanma odasına püskürtülmesiyle oluşan Cheng Çevriminin veriminin, basit çevrime göre daha yüksek

değerlere ulaştığı görülmektedir. Şekil 5.11, Şekil 5.12 ve Şekil 5.13’de türbin çalışma parametrelerine göre Cheng çevriminin ve basit çevrimin verim değerleri verilmiştir.

Ayrıca, Cheng Çevriminin, yanma odasına püskürtülen buhar miktarının arttırılıp azaltılmasıyla güç ihtiyaçlarının değişiklik göstereceği durumlarda kullanılabilmesi, önemli bir avantajdır.

KAYNAKLAR

- Aronis, N. and Leithner, R., (2002), “Combined Cycle with Low Quality Heat Integration and Water Injection into the Compressed Air”, Proceedings of the ECOS 2002 Conference, July 2002, Berlin
- Bolland, O. and Stadaas, J.F., (1995), “Comparative Evaluation of Combined Cycles and Gas Turbine Systems with Water Injection, Steam Injection, Recuperation”, ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 117: 138-145.
- Cardu, M. And Baica, M., (2002), “Gas turbine installation with total water injection in the combustion chamber, Energy Conversion and Management”, 43:2395-2404.
- De Paepe, M. And Dick, E., (2001), “Technological and economical analysis of water recovery in steam injected gas turbines, Applied Thermal Engineering 2001”, 21: 135-156.
- Fiaschi, D. And Manfrida, G.,(1998), “Exergy analysis of the semi-closed gas turbine combined cycle (SCGT/CC), Energy Conversion and Management”, 41:1191-1200.
- Heppenstall, T., (1998), “Advanced gas turbine cycles for power generation: a critical review, Applied Thermal Engineering”, 18: 837-846.
- Karaali, R. ve Öztürk, İ.T., (2007), “Gaz türbinli kojenerasyon sistemlerinin verimini iyileştirme yöntemlerinin incelenmesi”, Mühendis ve Makine, 49:550-557.
- Karamıklı, E. Teknik Termodinamik Ders Notları.
- Larson, E.D. and Williams, R.H., (1987), “Steam-Injected Gas Turbines”, ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 109: 55-63.
- Morrero, I.O., Lefsaker, A.M., Razani, A. And Kim, K.J., (2002), “Second law analysis and optimization of a combined triple power cycle”, Energy Conversion and Management, 43: 557-573.
- Moran, M.J. and Shapiro, h.n. (2000), “ Fundamentals of Engineering Thermodynamics”.
- Nelson, A.L.C. and Cheng, D.Y.,(2002), “The Chronological Development of the Cheng Cycle Steam Injected Gas Turbine During The Past 25 Years”, June 2002.
- Oh,S., Pang, H., Kim, S. And Kwak, H., (1996), “Exergy analysis for a gas turbine cogeneration system”, Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 118: 782-791.
- Öztürk, A. ve Kılıç, A., (1998), “Çözümlü problemlerle Termodinamik”, Çağlayan Kitapevi, İstanbul.
- Penning, F.M. and De Lange, H.C., (1996), “Steam Injection: Analysis of a typical application”, Applied Thermal Engineering, 16:115-125.
- Poullikkas, A., (2005), “An overview of current and future sustainable gas turbine technologies”, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2005 (9): 409-443.
- Rice,I.G., (1995), “Steam injected Gas Turbine Analysis: Steam Rates, ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power”, 117: 347-353.
- Roumeliotis, I. And Mathioudakis, K., (2009), “Evaluation of water injection effect on compressor and engine performance and operability”, Applied Energy, 4: 39
- Tuzson, J., (1991), “Status of steam-injected gas turbines, in: Proceedings of the 1991”, ASME COGEN-TURBO, Budapest, Hungary, 6: 19-24.

Wang, F.J. and Chiou, J.S., (2002), ‘‘Performance improvement for a simple cycle gas turbine GENSET-a retrofitting example’’, Applied Thermal Engineering 22: 1105-1115.

ÖZGEÇMİŞ

Doğum tarihi	10.06.1982	
Doğum yeri	Sivas	
Lise	1996-1999	Beşiktaş Lisesi
Lisans	1999-2004	Yıldız Teknik Üniversitesi Makine Fak. Makine Mühendisliği Bölümü

Çalıştığı kurumlar:

2006-Devam ediyor Sağlık Bakanlığı İl Sağlık Müdürlüğü