

**T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**BUHAR TÜRBİNLERİNİN KISMI YÜKLERDEKİ PERFORMANS
DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ**

ASIM SİNAN KARAKURT

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
GEMİ İNŞAATI VE GEMİ MAKİNELERİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
GEMİ İNŞAATI VE GEMİ MAKİNELERİ MÜHENDİSLİĞİ PROGRAMI**

**DANIŞMAN
PROF. DR. BAHİRİ ŞAHİN**

İSTANBUL, 2012

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**BUHAR TÜRBİNLERİNİN KİSMİ YÜKLERDEKİ PERFORMANS
DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ**

Asım Sinan KARAKURT tarafından hazırlanan tez çalışması 26.01.2012 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Gemi İnşaatı ve Gemi Makineleri Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı

Prof. Dr. Bahri ŞAHİN
Yıldız Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri

Prof. Dr. Bahri ŞAHİN
Yıldız Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Yasin ÜST
Yıldız Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. H. Hüseyin ERDEM
Yıldız Teknik Üniversitesi

ÖNSÖZ

Sanayileşmenin ve modernleşmenin artmasına paralel olarak artan enerji ihtiyacının karşılanmasında önemli bir yere sahip olan güç tesislerinin en önemli elemanlarından birisi olan buhar türbinleri ne kadar verimli çalışırlarsa o kadar ekonomik ve çevreci olmaktadır.

Buhar türbinlerinin dizayn koşullarında çalışması esnasında verimleri maksimum olmaktadır. Ancak, bir buhar türbini çoğu zaman dizayn şartlarında yani ulaşabileceği maksimum verim değerlerinde çalıştırılmamaktadır. Bu nedenle kısmi yük şartlarında sistemin karakteristiklerinin bilinmesine bağlı olarak yapılacak optimizasyonlar giderek önem kazanmaktadır.

Tez konumun belirlenmesinde ve sonraki süreçlerde yardımlarını esirgemeyen hocalarım Prof. Dr. Bahri ŞAHİN'e, Doç. Dr. Yasin ÜST'e ve Doç. Dr. H. Hüseyin ERDEM'e, maddi ve manevi desteklerinden dolayı mesai arkadaşlarıma ve aileme teşekkürü bir borç bilirim.

Ocak, 2012

Asım Sinan KARAKURT

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ.....	vi
KISALTMA LİSTESİ.....	vii
ŞEKİL LİSTESİ.....	viii
ÇİZELGE LİSTESİ	x
ÖZET	xi
ABSTRACT.....	xiii
BÖLÜM 1	
GİRİŞ.....	1
1.1 Literatür Özeti	1
1.2 Tezin Amacı	8
1.3 Hipotez	8
BÖLÜM 2	
ENERJİ TESİSLERİ	9
2.1 Enerji Tesislerinin Elemanları ve Çalışma Prensibi.....	9
BÖLÜM 3	
BUHAR TÜRBİNLERİ.....	12
3.1 Buhar Türbinlerinin Yapısı Ve Çalışma Prensibi	12
3.2 Buhar Türbinleri İçin Dizayn Şartları ve Dizayn Dışı Koşullar	13
BÖLÜM 4	
KİSMİ YÜK ŞARTLARI	16
4.1 Kısmi Yüklerde Buhar Türbinlerinin Çalışma Prensipleri	16
4.2 Yük Ayarlama Yöntemleri, Mekanizmaları ve Modelleri	22

4.2.1	Yük Ayarlama Yöntemleri	22
4.2.1.1	Kıs(ıl)ma Reglajı	22
4.2.1.2	Nozul (Meme) Kontrol Reglajı	23
4.2.1.3	Karışık reglaj	24
4.2.1.4	Bypass Reglajı	24
4.2.2	Yük Ayarlama Mekanizmaları	25
4.2.2.1	Direk Kontrol Sistemleri	26
4.2.2.2	Servomotorlu Kontrol Sistemleri	27
4.2.2.3	Hidrolik Kontrol Sistemleri	27
4.2.2.4	Dijital Kontrol Sistemleri	28
4.2.3	Matematiksel ve Termodinamik Model	29
4.2.3.1	Güç Çıktısı	30
4.2.3.2	Entalpi düşüşü ile basınç oranı arasındaki ilişki	30
4.2.3.3	Square Yasası (Elips Yasası-Stodola Konisi)	31
4.2.3.4	Schegliaev Modeli	32

BÖLÜM 5

TEKNİK ANALİZ	34
5.1 Örnek inceleme: Çan Termik Santrali	34
5.1.1 Çan Termik Santralinin Teknik Özellikleri	34
5.1.2 Kısmi yüklerde basınç ve debi değişimleri	36
5.1.3 Kısmi yüklerde entalpi düşüşü ve güç değişimleri	42
5.1.4 Kısmi yüklerde türbin kayıpları ve indike verimleri	48
5.1.5 Kısmi yüklerde sistemin termik verimi	61

BÖLÜM 6

SONUÇ VE ÖNERİLER	63
KAYNAKLAR	64
ÖZGEÇMİŞ	67

SİMGE LİSTESİ

h	Özgül entalpi (kJ/kg)
c	Bağıl buhar hızı (m/s)
U	Tekerlek hızı (m/s)
\dot{m}	Kütlelel debi (kg/s)
$\dot{m}_{D(0)}$	Dizayn şartları kütlelel debi (kg/s)
η_{ri}	Kanat verimi
k	izentropik katsayı
R	Evrensel gaz sabiti (kJ/kg.K)
P_{2i}, P_g	Giriş basıncı (kPa)
P_{1i}, P_{ϕ}	Çıkış basıncı (kPa)
v	Özgül hacim (m ³ /kg)
T	Sıcaklık (K)
ϕ	Sabit akım katsayısı
Y_{Di}	Stodola sabiti
σ	Basınç oran katsayısı
ϵ^*	k'ya bağlı bir oran
h_d	Nozul/sabit kanat kaybı (kJ/kg)
h_s	Hareketli kanat kaybı (kJ/kg)
h_a	Çıkış kaybı (kJ/kg)
h_{rv}	Tekerlek sürtme ve rüzgarlama kaybı (kJ/kg)
h_{sp}	Aralık kaçak kaybı (kJ/kg)
h_t	Teorik iş veya teorik ısı/entalpi düşüşü (kJ/kg)
h_u	Türbin çevre işi (kJ/kg)
h_i	Türbin indike/iç işi (kJ/kg)
η_i	Türbin indike/iç verimi
η_{th}	Tesisin termik verim
N_e	Tesisten elde edilen güç (kW)
Q_v	Tesise verilen ısı (kW)

KISALTMA LİSTESİ

rpm	Türbinin dakikadaki devir sayısı (d/d)
CFD	Hesaplamalı akışkanlar dinamiği
STuCA	Steam Turbine Cogeneration Analysis
RaNS	Favre-Reynolds-Navier–Stokes
PEPSE	Güç tesisi performans analiz programı
EES	Engineering equation solver
EÜAŞ	Elektrik Üretim A.Ş.
YBT	Yüksek basınç türbini
OBT	Orta basınç türbini
ABT	Alçak basınç türbini

ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 1. 1	Üç ve beş basamaklı türbinler için ψ 'ye bağlı parametreler [6].....4
Şekil 1. 2	STuCA programının alt modelleri [9]..... 5
Şekil 1. 3	6300 rpm hızına karşılık gelen bağıl debi değerleri [10] 6
Şekil 1. 4	Farklı debiler elde edilen için akım izleri [10]..... 6
Şekil 2. 1	ABD ve Türkiye'deki enerji üretiminin güç tesislerine göre dağılımı [16]. 10
Şekil 2. 2	Basit Rankine çevrimi [17] 10
Şekil 4. 1	Basınç ve debi ilişkisi [20] 16
Şekil 4. 2	Farklı yüklerde akım hattında meydana gelen değişiklikler [20]..... 18
Şekil 4. 3	Karşı basınçla çalışan türbinlerde reglaj prensibi [21] 19
Şekil 4. 4	Ara buhar çekilen türbinlerde reglaj prensibi [21] 20
Şekil 4. 5	Türbinlerde ara buhar çekme çeşitleri (Woodward)..... 21
Şekil 4. 6	Çift basınçlı türbinlerde reglaj prensibi [21]..... 21
Şekil 4. 7	Kısılma reglajı [19] 23
Şekil 4. 8	Nozul (meme) reglajı [19]..... 23
Şekil 4. 9	Bypass reglajı [19]..... 24
Şekil 4. 10	Bir kontrol mekanizmanın genel görünümü [24]..... 26
Şekil 4. 11	Direkt reglaj [19] 26
Şekil 4. 12	Servo motor çalışma prensibi (Baldor)..... 27
Şekil 4. 13	Hidrolik servo kontrol sistemi [19]..... 28
Şekil 4. 14	Dijital kontrol sistemi (Woodward)..... 29
Şekil 4. 15	Stodola eğrisi [6] 32
Şekil 5. 1	Çan termik santrali [27] 35
Şekil 5. 2	Çan termik santrali akış diyagramı [28]..... 35
Şekil 5. 3	Basıncın yüke göre değişimi (YBT) 37
Şekil 5. 4 a)	Basıncın yüke göre değişimi (OBT_1) 37
Şekil 5. 4 b)	Basıncın yüke göre değişimi (OBT_2)..... 38
Şekil 5. 4 c)	Basıncın yüke göre değişimi (OBT_3) 38
Şekil 5. 5 a)	Basıncın yüke göre değişimi (ABT_1)..... 39
Şekil 5. 5 b)	Basıncın yüke göre değişimi (ABT_2)..... 39
Şekil 5. 5 c)	Basıncın yüke göre değişimi (ABT_3) 40
Şekil 5. 5 d)	Basıncın yüke göre değişimi (ABT_4)..... 40
Şekil 5. 6	Debinin yüke göre değişimi (YBT)..... 41
Şekil 5. 7	Debinin yüke göre değişimi (OBT) 41
Şekil 5. 8	Debinin yüke göre değişimi (ABT) 42

Şekil 5. 9	Entalpi düşüşünün yüke göre değişimi (YBT)	43
Şekil 5. 10	Entalpi düşüşünün h-s diyagramında gösterilmesi (YBT)	44
Şekil 5. 11	Entalpi düşüşünün yüke göre değişimi (OBT)	44
Şekil 5. 12	Entalpi düşüşünün h-s diyagramında gösterilmesi (OBT)	45
Şekil 5. 13	Entalpi düşüşünün yüke göre değişimi (ABT)	45
Şekil 5. 14	Entalpi düşüşünün h-s diyagramında gösterilmesi (ABT)	46
Şekil 5. 15	Gücün yüke göre değişimi	47
Şekil 5. 16	Gücün yüke göre değişimi (OBT)	48
Şekil 5. 17	Gücün yüke göre değişimi (ABT)	48
Şekil 5. 18	Türbin basamak kayıpları	49
Şekil 5. 19 a)	Türbin iç veriminin yüke bağlı değişimi-Firma (YBT)	50
Şekil 5. 19 b)	Türbin iç veriminin yüke bağlı değişimi-Kayıp hesabı (YBT)	50
Şekil 5. 20	Türbin kayıplarının yüke bağlı değişimi (YBT)	51
Şekil 5. 21 a)	Türbin iç veriminin yüke bağlı değişimi (OBT)	52
Şekil 5. 21 b)	Türbin iç veriminin yüke bağlı değişimi-Kayıp hesabı (OBT)	53
Şekil 5. 22	Türbin kayıplarının yüke bağlı değişimi (OBT)	53
Şekil 5. 23 a)	Türbin kayıplarının yüke bağlı değişimi (OBT ₁)	54
Şekil 5. 23 b)	Türbin kayıplarının yüke bağlı değişimi (OBT ₂)	55
Şekil 5. 23 c)	Türbin kayıplarının yüke bağlı değişimi (OBT ₃)	55
Şekil 5. 24 a)	Türbin iç veriminin yüke bağlı değişimi-Firma (ABT)	57
Şekil 5. 24 b)	Türbin iç veriminin yüke bağlı değişimi- Kayıp hesabı (ABT)	57
Şekil 5. 25	Türbin kayıplarının yüke bağlı değişimi (ABT)	58
Şekil 5. 25 a)	Türbin kayıplarının yüke bağlı değişimi (ABT ₁)	59
Şekil 5. 25 b)	Türbin kayıplarının yüke bağlı değişimi (ABT ₂)	60
Şekil 5. 25 c)	Türbin kayıplarının yüke bağlı değişimi (ABT ₃)	60
Şekil 5. 25 d)	Türbin kayıplarının yüke bağlı değişimi (ABT ₄)	61
Şekil 5. 26	Tesisin termik veriminin yüke bağlı değişimi	62

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 5. 1	Türbin giriş ve çıkış basınçlarının yüke göre değişimi.....	37
Çizelge 5. 2	Kütleli debilerin yüke göre değişimi.....	41
Çizelge 5. 3	Türbinlerdeki entalpi düşüşlerinin yüke göre değişimi.....	43
Çizelge 5. 4	Türbinlerde üretilen güçlerin yüke göre değişimi.....	47
Çizelge 5. 5	Türbin izentropik veriminin yüke bağlı değişimi (YBT)	49
Çizelge 5. 6	Türbinlerdeki kayıpların yüke bağlı değişimi (YBT)	51
Çizelge 5. 7 a)	Türbin izentropik veriminin yüke bağlı değişimi (OBT)	52
Çizelge 5. 7 b)	Türbin izentropik veriminin yüke bağlı değişimi (OBT)	52
Çizelge 5. 8	Türbin kayıplarının yüke bağlı değişimi (OBT)	53
Çizelge 5. 9 a)	Türbin kayıplarının yüke göre değişimi (OBT ₁)	53
Çizelge 5. 9 b)	Türbin kayıplarının yüke göre değişimi (OBT ₂)	54
Çizelge 5. 9 c)	Türbin kayıplarının yüke göre değişimi (OBT ₃)	55
Çizelge 5. 10 a)	Türbin izentropik verimlerinin yüke bağlı değişimi (ABT)	56
Çizelge 5. 10 b)	Türbin izentropik verimlerinin yüke bağlı değişimi (ABT)	57
Çizelge 5. 11	Türbin kayıplarının yüke bağlı değişimi (ABT)	58
Çizelge 5. 12 a)	Türbin kayıplarının yüke bağlı değişimi (ABT ₁)	59
Çizelge 5. 12 b)	Türbin kayıplarının yüke bağlı değişimi (ABT ₂)	59
Çizelge 5. 12 c)	Türbin kayıplarının yüke bağlı değişimi (ABT ₃)	60
Çizelge 5. 12 d)	Türbin kayıplarının yüke bağlı değişimi (ABT ₄)	61
Çizelge 5. 13	Tesisin termik veriminin yüke bağlı değişimi.....	62

**BUHAR TÜRBİNLERİNİN KİSMİ YÜKLERDEKİ PERFORMANS
DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ**

Asım Sinan KARAKURT

Gemi İnşaatı ve Gemi Makineleri Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Bahri ŞAHİN

Günümüzde hem dünyanın her yanına yayılmış irili ufaklı sanayi tesislerinin hem de gündelik hayatta insanların elektriğe bağımlılığının artmasıyla birlikte enerjiye olan ihtiyaç da hızla artmaktadır. Artan ihtiyaçların karşılanabilmesi ise ya daha büyük kapasiteli güç tesisleri yapılarak ya da mevcut tesislerin daha verimli hale getirilmesiyle mümkün olmaktadır. Güç üretim tesislerinin daha verimli çalıştırılabilmesi ise çalışma koşullarının tam olarak bilinebilmesine ve bu koşullar göz önünde bulundurularak yapılacak optimizasyonlara bağlıdır.

Güç üreten tesislerin en önemli elemanlarından birisi olan buhar türbinlerinin dizayn koşulları belirli parametreler (giriş basınç ve sıcaklığı, güç ve debi miktarı, çıkış basıncı vb.) esas alınarak oluşturulur ve türbinin geometrisi, ölçüleri ve performansı bu değerlere göre hesaplanır. Dizayn koşullarında türbindeki kayıplar ve tersinmezlikler minimum, hız değerleri ve üretilen güç maksimumdur. Ancak, bir buhar türbini gerek talep edilen güç miktarının değişkenliği gerek türbin kayıpları gerekse sistemin diğer elemanlarından kaynaklanan kayıplardan dolayı dizayn şartlarında çoğu zaman çalışamaz yani daha düşük verimlerde çalışmak zorunda kalır.

Bu çalışmada farklı yük koşullarında işletilen ve dizayn değerlerine sahip olduğumuz Çan Termik Santraline ait verilerden yola çıkılarak EES programında modellediğimiz sistemimizin hem termik verimi hem de türbin verimleri incelenmiştir. Yapılan analizler neticesinde tesisin yükü azaldıkça hem türbini hem de tesisin performans değerlerinin olumsuz etkilendiği görülmüştür.

Tezin geliştirilmesine yönelik olarak kısmi yüklerde enerji maliyeti, emisyon değerleri ve ekserji analizleri gibi konularda çalışmaların yapılması planlanmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Buhar türbini, kısmi yük, dizayn dışı koşullar, verim, termik santral

**ANALYSIS OF THE PART LOAD CONDITIONS EFFECTS ON TURBINE
PERFORMANCE**

Asım Sinan KARAKURT

Department of Naval Architecture and Marine Engineering

MSc. Thesis

Advisor: Prof. Dr. Bahri ŞAHİN

Power consumption and demand are highly increasing which are related with the growing of the industrial plants and daily using. More power demand can be supplied with building up new and optimized, more efficient power plants which depend on many specifications for different working conditions or points.

One of the most important items of a power plant is steam turbine which is designed according to defined parameters (inlet pressure and temperature, flow rates, outlet pressure and power outlet). The dimensions and performance of the turbine are calculated with these parameters. Turbine losses and irreversibilities are minimum and velocities and generated power are maximum at design conditions. However, power plants always have to operate at off-design or part-load conditions because of the changing of power demands and drop outs of the turbines and other items of the power plants.

In this master thesis, it is aimed to analyses steam turbine isentropic efficiencies and power plant thermal performance at different load conditions for Çan (Çanakkale-Turkey) power plant which is modelled by EES (Engineering Equation Solver). The analyses showed that both steam turbines and power plant performance were reduced when the power plant operate at partial load conditions.

In future studies, emission rates, exergetic performance and cost analyses at part load conditions will be done in order to improve this study.

Keywords: Steam turbines, part load, off design conditions, efficiency, power plant

GİRİŞ

1.1 Literatür Özeti

Kısmi yük koşullarının buhar türbinlerinin davranış ve performanslarına etkilerini incelemek için 1900'lü yıllardan başlayarak yapılan çalışmalar günümüzde daha modern araçlarla ve farklı parametreler göz önünde tutularak sürdürülmektedir. Bu çalışma kapsamında genel bir bakış açısına sahip olabilmek için faydalanılan kaynakların özetleri aşağıda sunulmuştur.

Buhar türbinlerinin dizayn ve dizayn dışı koşullarda çalıştırılması ve buna bağlı olarak elde edilecek güç ve verim değerleri ile ilgili ilk ve en temel kaynaklardan birisi Aurel Stodola tarafından yapılan çalışmadır. Matematiksel ifadelerini Bölüm 6'da vereceğimiz bu çalışma ile buhar debisi ve basıncı arasındaki ilişkiye bağlı olarak kısmi yüklerde güç ve performans değerlerindeki değişimler incelenebilmektedir.

Bresolin vd. [1] yaptıkları çalışmada farklı kontrol tiplerinde buhar türbinlerinin kısmi yüklerdeki davranışlarını simüle etmeyi amaçlamışlardır. Bu amaçla basıncı debinin bir fonksiyonu olarak tanımlayan Schegliáiev ve Stodola yasalarına göre giriş basınçları hesaplanan sistemler karşılaştırılmıştır. Hesaplama yöntemlerinden ilkinin teorik olmasına karşın ikincisi deneysel bir modeldir. Bu çalışmada incelenen yük kontrol tipleri:

- Değişken basınçlı (buhar debisinin ve basıncının kazan ve pompa tarafından ayarlanabildiği) kontrol,

- Kısmi vanalı (buharın hem basıncının hem de sıcaklığının sınırlandırılabilirdiği) kontrol,
- Nozul valfli (ilk kademedeki buhar debisinin sıralı valfler ile ayarlandığı) kontrol yöntemleridir.

Sonuç olarak Schegliáiev ve Stodola'nın modelleri buhar türbinleri için belirlenen teorik çalışma koşullarındaki değerlere yakın sonuçlar vermiştir. Yapılan analizler sonucunda düşük kısmi yüklerle karşılık gelen değerlerde çıkış buharının aşırı kızdırılmış olmasına göre kontrol için kısma yönteminin en uygun olmasına karşın dizayn şartlarına yakın yük değerlerinde değişken basınçlı kontrol sisteminin daha verimli olduğu görülmüştür [1].

Marc ve diğerleri [2] yaptıkları çalışmada ısı ve güç (kojenerasyon) sistemlerinin dizayn ve çalışma koşullarının optimizasyonu üzerinde yoğunlaşmışlar ve dizayn aralıkları içerisindeki kısmi yük koşullarını göz önünde bulundurarak teknik ve ekonomik yönden fayda sağlaması için matematiksel bir yöntem geliştirmişlerdir. Geliştirilen bu yöntem, içerisinde birçok bilinmeyen bulunan problemleri birleşik çözümleme yöntemleri ile çözen genişletilmiş *dal ve kesme algoritmaları (Branch and Cut Algorithms)* yardımıyla oluşturulmuştur.

Grönman ve Saaresti [3] yayınladıkları çalışmada tam ve kısmi yüklerde rotor-stator arası aksel boşlukların değişiminin performansa ve akım hatlarına etkilerini incelemişlerdir. Bu çalışma için üç farklı aksel boşluk belirlenmiş ve türbin veriminin boşluk arttıkça azaldığı görülmüştür. Bu azalmanın kısmi yük koşullarında dizayn koşullarına göre daha fazla olduğu ve verimdeki bu azalmaya da artan boşluklardaki basınç kayıplarının neden olduğu yapılan analizler neticesinde ortaya çıkmıştır. Sonuç olarak, aksel boşlukların mesafeleri ne kadar kısa olursa o kadar daha verimli olduğu ortaya çıkmıştır.

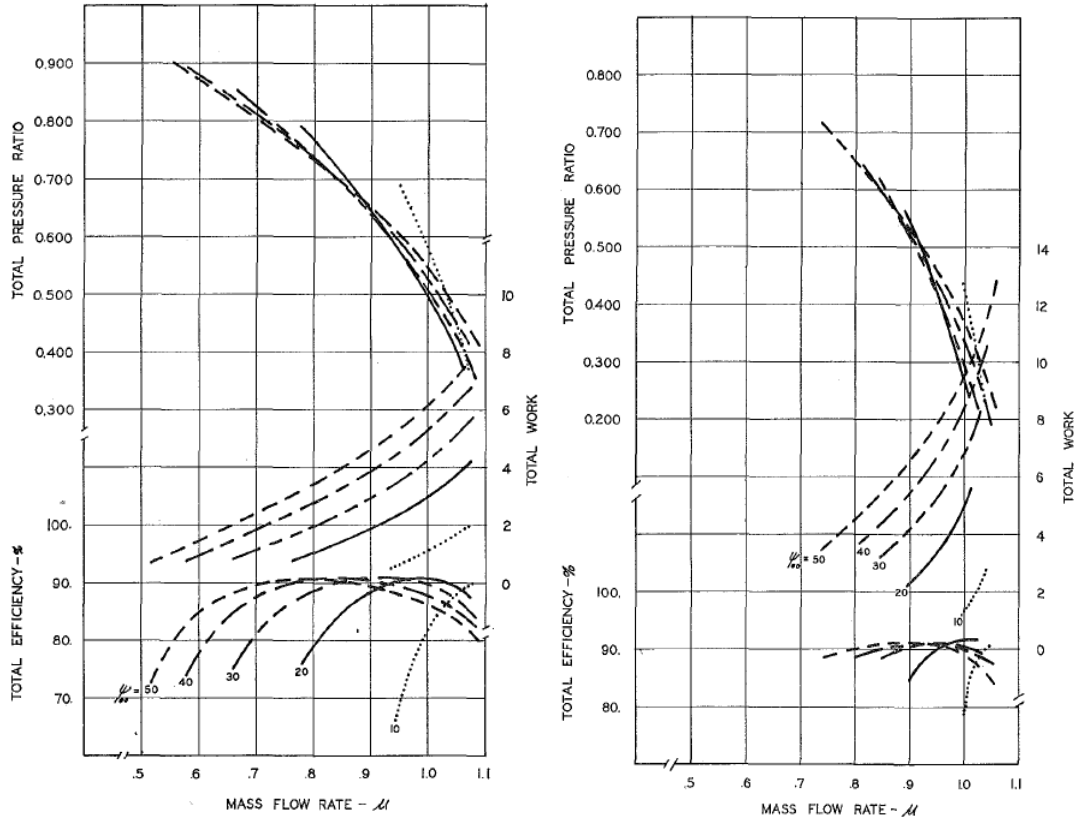
Weir [4], çevrimin entalpi dengesi ve türbindeki basamak gruplarının akım geçiş karakteristikleri arasındaki uyumu göz önünde tutarak kısmi yüklerde buhar türbinlerinin performanslarını tahmin edebilmek için Stodola'nın Elips Yasasını temel alan ve hızlı yakınsak döngüler kullanarak çözümler yapabilen analitik bir yaklaşım geliştirmiştir.

Cooke [5], Elips Yasası olarak bilinen genelleştirilmiş nozul benzerliğini kullanarak bir kojenerasyon tesisindeki çok basamaklı türbinlerin kısmi yüklerdeki basınçlarının modellenmesini incelediği çalışmada sabit akım katsayısı yönteminin genelleştirilmiş Elips Yasasının çok özel bir durumu olduğunu göstermiştir.

Türbin elemanlarının performanslarının değişken koşullarda belirlenmesi hem enerji hem de endüstri tesisleri için önemlidir. Spesifik geometriye sahip türbinlerin kısmi yüklerdeki performansları deneysel olarak belirlenebilir.

Kroon ve Tobiasz [6] yaptıkları çalışmada dizayn değerleri bilinen bir türbinin kısmi yüklerdeki türbin işini, akışkanın akışını ve sistemin verimini tahmin edebilmek için basit bir yöntem sunmuşlardır. Yapılan çalışmada kanat geometrisinin (bir boyutlu) aksenal bir akıma sahip olduğu, akışkanın sabit özgül ısılarında ideal gaz davranışı sergilediği, türbin elemanlarının maksimum verim şartlarında (dizayn şartlarında) çalıştığı, akım yönünün kanat uzunluğuna bağlı olarak sabit kaldığı, analizlerin ses hızının altındaki değerleri kapsadığı, Reynolds numarası, Mach sayısı ve türbin seviyelerindeki değişimlerin etkilerinin ihmal edildiği kabul edilmiştir.

Yaptırılan hesaplamalar neticesinde üç ve beş basamaklı türbinler için özgül entalpi değerinin tekerlek hızının karesiyle ($\psi=h/U^2$) olan oranına bağlı olarak Şekil 1'deki grafikler elde edilmiştir [6].



Şekil 1. 1 Üç ve beş basamaklı türbinler için ψ 'ye bağlı parametreler [6]

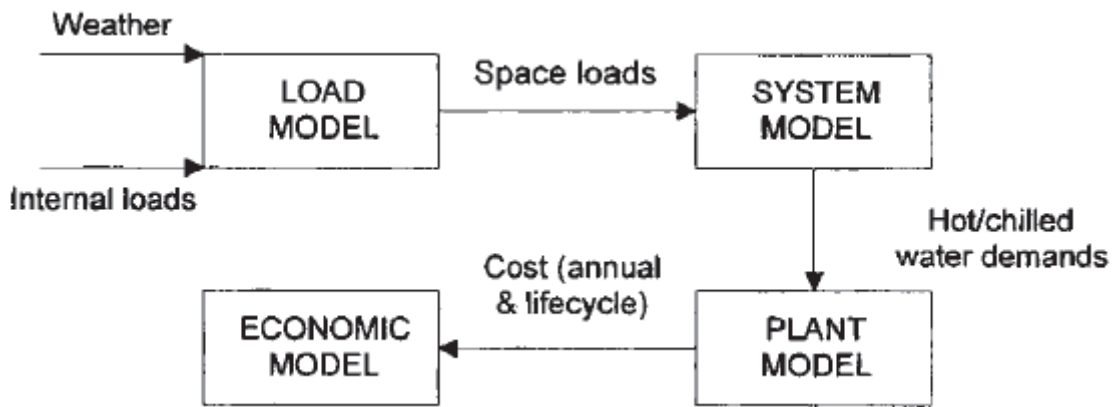
Petrovic ve Riess [7], büyük buhar türbinlerinde akım hesaplamaları ile ilgili doğrusal akım ve sonlu eleman yöntemlerini temel alan bir metot sunmuşlardır. Bu metot geniş bir aralıkta farklı giriş basıncı ve debisine göre çalışan 165 MW'lık bir tesisin üç basamaklı düşük basınç türbinine uygulanmıştır. Neticede, incelenen işletme koşullarında ilk iki basamaktaki akım alanlarının ve verimlerin çok az değiştiği ancak, %35 yükte çalışırken türbinin son basamağındaki iç verimin ve işin sıfır olduğu görülmüştür.

Dorney vd. [8] türbinlerin hem dizayn hem de farklı kısmi yük şartlarındaki çalışma koşullarını iki ve üç boyutlu CFD ve ortalama yöntem (meanline) ile hem akım yolu hem de aerofil geometrilerine bağlı olarak incelemiştir. Bu çalışma ile kısmi yüklerde oluşan akım koşullarında türbin performansını belirlemek ve akım şartlarının bir fonksiyonu olarak değişkenliklerin karakterize edilmesi amaçlanmıştır.

O'Brien ve Bansal [9], buhar türbinli kojenerasyon tesislerinde farklı yüklerde sistemin performansını ve ekonomik etüdünü yapabilecek bir program (Steam Turbine

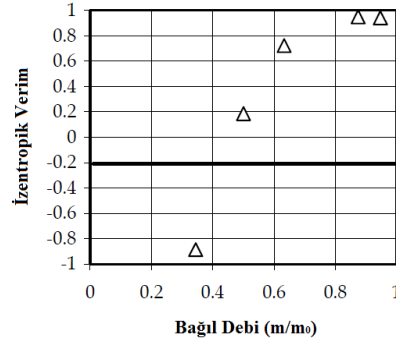
Cogeneration Analysis, STuCA) geliştirmişlerdir. C++ programı ile geliştirilen program, temel mőhendislik denklemlerini kullanarak kısmi yőkleri hesaba katmayan statik dizayn noktaları ile kőçük işletmeler için oldukça pahalı olan karmaşık kısmi yők modelleri arasında bir bağlantı vazifesi gėrmektedir.

Birbiri ile uyum içerisinde çalışan dört alt modelden (yők, sistem, tesis ve ekonomik model) oluşan programın girdilerini ısı değiştiricilerinin ve soğutma sistemlerini yők profili, kazandaki yanmanın ve kullanılan yakıtın özellikleri, işletme koşulları, sistemdeki her bir elemanı tanımlayan bilgiler ile yakıt ve elektrik fiyatları oluştururken, çıktılarını ise farklı işletme koşullarında ısı değiştiricilerdeki ısı transferi ve akışkan özellikleri, kazan işletme parametreleri ve verim ifadelerinin farklı yőklerdeki değerleri, tesisin evre ve işletme koşulları, tesisin termodinamik analizi ve dizayn şartlarına gėre kıyaslanmış ekonomik değerler oluşurmaktadır [9].

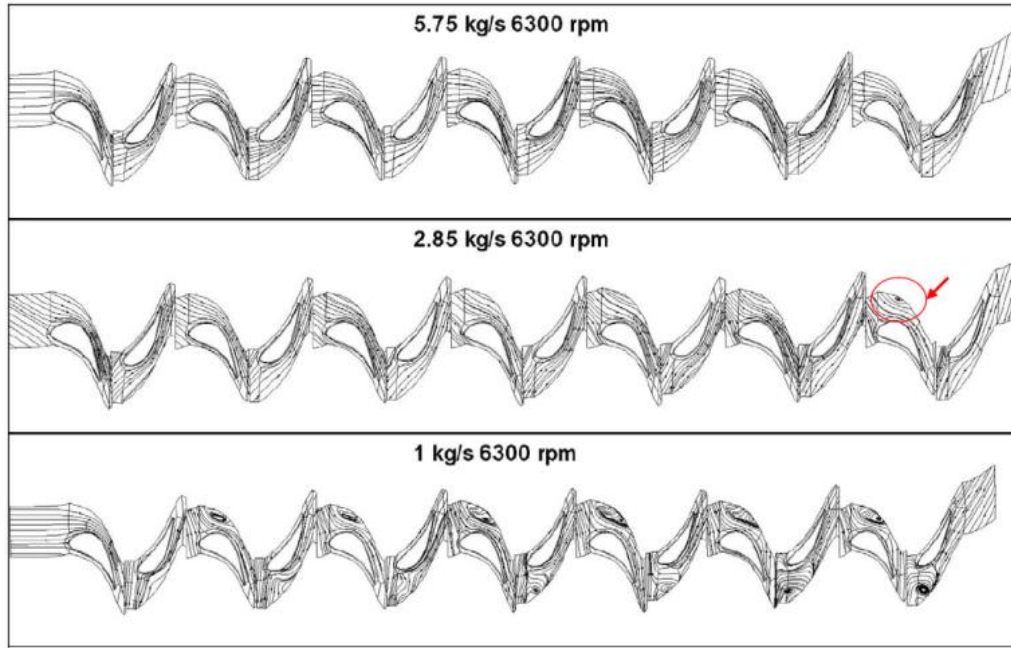


şekil 1. 2 STuCA programının alt modelleri [9]

Yőksek basınçlı buhar tőrbınlerinde bőyők rotor kanatları ve dőřők akım şartlarında çalışmayı gerektiren kısmi yők koşulları nedeniyle meydana gelen rőzgarlama kayıplarını tam olarak tanımlayıp, hem ekonomik hem de teknik riskleri azaltmak için, önceden önlemler almamıza yardımcı olacak teorik modellerin eksikliği nedeniyle Herzog vd. [10] kısmi yők davranışlarını tahmin edebilmek için bir çalışma yapmışlardır. Yapılan çalışmada dört basamaklı bir tőrbının akım alanının lőlerini dőřők Mach sayılarında analiz ederek tőrbının aerodinamik özelliklerini ve hem kısmi yőklerdeki hem de açma-kapama anlarındaki akış mekanizmasını daha iyi anlamamızı sağlayacak deneysel ve sayısal veriler yayınlanmış ve bu verilerden yola çıkılarak yedi basamaklı bir tőrbın modellenmiştir.



Şekil 1. 3 6300 rpm hıza karşılık gelen bağıl debi değerleri [10]



Şekil 1. 4 Farklı debiler elde edilen için akım izleri [10]

Gerolymos ve Hanisch [11], kısmi yüklerde çalışan dört basamaklı bir türbini temel alarak çok kademeli turbo makineler için üç boyutlu bir akım hesaplama programı modellemesi geliştirmişlerdir. Akımı modellemek için üç boyutlu ortalama Favre-Revynolds-Navier-Stokes (RaNS) eşitlikleri kullanılmıştır. Bu hesaplama yöntemi ile 8 sıra kanat, rotor ile kanat ucu arasındaki mesafede dahil olmak üzere, 6×10^6 nokta kullanılarak oluşturulmuş ve sıralar arasında karışım plakaları (mixing planes) kullanarak zaman ortalama akım hesaplamaları yapılmış ve sonuçlar farklı işletme koşulları (dizayn koşulları, dizayn hızında kısmi yük koşulları ve kısmi hızlarda kısmi yük koşulları) için ölçülen değerlerle karşılaştırılmıştır.

Yapılan hesaplamalar neticesinde kısmi yüklerdeki işletme koşullarında son statorun konkav tarafındaki akım alanlarında büyük ayrışmaların olduğu ortaya çıkarılmıştır. Kök etrafında oluşan kuvvetli dairesel girdapların negatif etkisi nedeniyle son rotorda akım hattındaki değişimler oldukça net bir şekilde gözlemlenebilmiştir. Bu dairesel girdapların akımı yukarıya doğru ötelediği, türbin karterine zarar verdiği ve kanatlar arası kanallarda tıkanmalara sebebiyet verdiği tespit edilmiştir [11].

He [12], kısmi genişlemeler nedeniyle oluşan düzensiz akımların çok kademeli türbinlerin aerodinamik performansına etkilerini incelediği çalışmasında üç boyutlu bir Navier-Stokes yöntemi geliştirmiştir. Çalışmasında kısmi genişlemelerde, tek bir kademe için, kanat üzerindeki değişken kuvvetleri hesaplatırarak sonuçları deneysel verilerle karşılaştırmıştır.

Stastny vd. [13] kısmi yük şartlarında bir türbin kesitindeki akım hatlarının kanat boylarıyla ilişkisini inceleyen bir rapor yayınlamıştır. Dizayn dışı akım şartlarında kesit girişindeki hız vektörlerinin değişimi işletme süresince hesaplanarak elde edilen sonuçlar deneysel verilerle karşılaştırılmıştır. Giriş (öncül) kenarında akım hatlarındaki ayrışmanın genelde dizayn dışı şartlarda ortaya çıktığı rapor edilerek bu durumun kinetik enerji kayıpların artmasına neden olacağı da belirtilmiştir. Statik ve stagnasyon basınç oranlarının kanat profili boyunca dağılması rotor kanadındaki açının kısmi yüklerde negatif olduğunu ortaya çıkarmıştır. Bu ise kanadın girişindeki stagnasyon noktasının emme tarafına doğru kaydığını göstermiştir ki bu da kanat girişindeki akım hattının bozulmasına neden olmaktadır. Profil yüzeyi üzerindeki basıncın dağılması akım ayrışması hakkında bilgiler vermektedir.

Mandal [14], buhar türbinlerinin kısmi yük performanslarını tahmin edebilmek için bir yazılım geliştirmiştir. Bu yazılımı geliştirirken kısmi yük koşullarının oluşmasına neden olan bazı parametreleri (buhar debisinin, buharın başlangıç parametrelerinin, kondenser basıncının ve türbin hızının değişmesini) göz önünde bulundurmuş ancak, ara buhar almalı türbinlerde meydana gelebilecek basınç ve debi değişimleri ile alçak basınç kesitlerindeki buharın kuruluk derecelerini dikkate almamıştır. Geliştirdiği yazılım hem yüksek basınç hem de orta basınçlı türbinlerde iyi sonuçlar vermesine rağmen düşük basınç türbinlerinde yeterince iyi sonuçlar verememektedir.

Bhattacharya [15], kısmi yüke sebep olan şartlar, türbinin ara kademelerinden buhar çekilmesi ve gerçek akış koşulları neticesinde kısmi yüklerde çalışan tüm türbin tiplerinde meydana gelen verim azalmasını araştırarak Mandal'ın [14] yaptığı çalışmayı;

- Tüm sistemin ve her bir basamağın verimlerinin tahmin edilebilmesi için termodinamik analizlerini yaparak,
- Güncel düzeltmeler ve alt programlar ekleyerek,
- Buharın kuruluk derecesinin, rüzgarlama kayıplarının, profil kayıplarının ve sızıntı kayıplarının etkilerini dahil ederek,
- Modeli simüle edip aynı işletme koşulları için gerçek bir tesisten alınan ve PEPSE programından elde edilen verilerle karşılaştırarak,
- Aynı işletme koşulları için PEPSE programından elde edilen verilerle optimize edilmiş bir rejeneratif bir ara buhar almalı çevrim oluşturarak,
- Farklı kısmi yüklerde ara buhar akımını Monte-Carlo evrensel optimizasyon yöntemi ile optimize ederek ve bunun çevrim verimine ve güç çıktısına etkilerini inceleyerek daha da zenginleştirmiştir.

1.2 Tezin Amacı

Dizayn dışı koşullarda/Kısmi yük şartlarında performans değişimleri inceleyen deneysel ve sayısal çalışmalar genelde türbinlerin iç verimlerindeki değişimleri incelemişlerdir. Bu bağlamda literatürde birçok eser bulunmaktadır.

Yüksek lisans tezi olarak yaptığımız bu çalışmada ise kısmi yüklerde hem türbinlerin hem de genel olarak sistemin performans analizleri yük miktarı değişken kabul edilerek EES programı yardımıyla halen kullanımda olan Çan Termik Santrali üzerinden yapılacaktır.

1.3 Hipotez

Kısmi yük şartların çalışan bir tesiste hem sistemin hem de sistemi oluşturan her bir elemanın performansı kötüleşir.

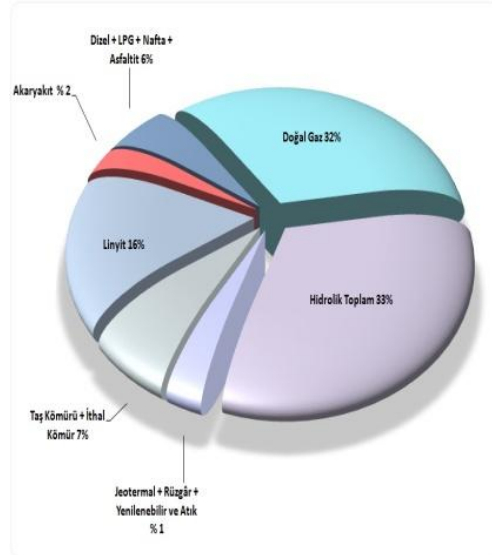
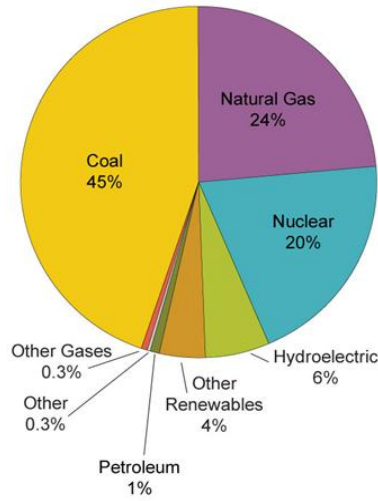
ENERJİ TESİSLERİ

2.1 Enerji Tesislerinin Elemanları ve Çalışma Prensipleri

Gündelik hayatta, sanayi tesislerinde ve ulaşım araçlarında elektriğe olan ihtiyacın günden güne artması bu ihtiyacı karşılamak için farklı türden güç üretim tesislerinin (nükleer, termik, güneş, rüzgar, jeotermal enerji tesislerinin) kapasitelerinin artırılmasını ve optimizasyonunu gerekli kılmaktadır.

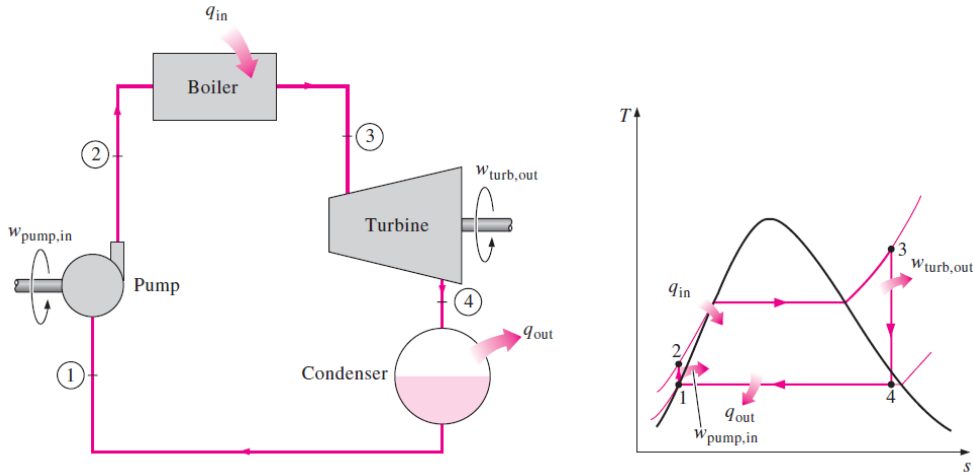
Amerikan Enerji Bakanlığı 2010 yılı verilerine¹ göre üretilen elektriğin yaklaşık olarak %90'ı ve EÜAŞ 2011 Mart verilerine göre ise Türkiye'de üretilen elektriğin yaklaşık olarak %70'i termik ve(ya) nükleer santrallerden elde edilmektedir (Şekil 2.1). Bu santrallerin neredeyse tamamında buhar türbinli sistemler kullanılmaktadır. Bunlara ek olarak birçok güneş ve jeotermal enerji tesisinde de buhar türbinleri güç üretmek amacıyla kullanılmaktadır [16].

¹<http://www.eia.gov/>



Şekil 2. 1 ABD ve Türkiye'deki enerji üretiminin güç tesislerine göre dağılımı [16]

Buhar türbinlerinin kullanıldığı enerji üretim tesisleri genelde Şekil 2.2'de görülen Rankine çevrimine göre çalışırlar. En basit haliyle çevrimi buhar kazanı, buhar türbini, kondenser (yoğuşturucu) ve pompa oluşturmaktadır [17].



Şekil 2. 2 Basit Rankine çevrimi [17]

Yüksek basınca sahip buhar kazana girerek burada gerçekleşen ısı alışverişi neticesinde yüksek sıcaklık değerlerine ulaşır. Kazandan çıkan yüksek basınca ve sıcaklığa sahip kızgın buharın türbin(ler)de kondenser basıncına veya daha yüksek basınçlara kadar genişlemesiyle güç üretilir ve daha sonra yoğuşturulmak üzere kondensere yollanır. Kondenserden doymuş sıvı olarak çıkan buhar da pompalardan ve verim arttırmak

amacıyla, türbinlerin ara kademelerinden çekilen buharla çalışan, besleme suyu ısıtıcılarından geçerek tekrar kazana girer ve böylece çevrim tamamlanmış olur.

Çevrimden elde edilecek net iş ve termik verim pompalarda ve kondenserde harcanan enerjiye, kazanda yakılan yakıtın kimyasal değerlerine, kazan verimine ve buharın türbine giriş-çıkış şartlarına bağlıdır.

Türbine giren buharın sıcaklığında, basıncında veya debisinde meydana gelecek herhangi bir değişme ile çıkış şartlarında meydana gelecek basınç değişimleri hem türbinin iç verimine hem de sistemin net işine ve termik verimine olumlu veya olumsuz bir şekilde yansıtacaktır.

BUHAR TÜRİNLERİ

3.1 Buhar Türbinlerinin Yapısı Ve Çalışma Prensibi

Buhar türbinleri, akışkan olarak kullanılan yüksek basınçlı ve yüksek sıcaklıklı buharın sahip olduğu potansiyel enerjiyi sabit ve hareketli kanatları vasıtasıyla önce kinetik enerjiye daha sonra da mekanik enerjiye çevirebilen ısı makineleridir.

Buhar türbinleri de diğer tüm ısı makineleri gibi yüksek sıcaklıklı kaynaktan (kazan) gelen akışkanı kullandıktan sonra dış ortama (kondenser) atmakta ve böylece güç üretmektedir. Buhar türbinleri birkaç bar basınçtan 100-120 bar basınç ve 650-700 °C sıcaklık değerlerine kadar geniş bir aralıkta çalışabilmekte ve bu esnada birkaç kilovattan 1500-2000 MW'a kadar güç üretebilmektedir.

Genel olarak bir buhar türbini iki kısımdan oluşmaktadır. Bunlar;

- i. Sabit parçaların oluşturduğu stator
- ii. Hareketli parçalardan oluşan rotordur.

Türbinin stator kısmını karterler (üst ve alt karter), ara kanat aynaları, meme ve sabit kanatlar, salmastralar ve yataklar (taşıyıcı ve aksel yataklar) oluştururken rotor kısmını da shaft, seygar-hareketli kanatlar, tekerlekler, tamburlar ve kavramalar oluşturmaktadır [18].

Buhar türbinleri birçok farklı kategoride (yapısına, buharın giriş ve çıkış koşullarına, ısı düşüş prosesine, kullanım yerine ve kontrol yöntemlerine göre) sınıflandırılabilir. Bazı sınıflandırma çeşitleri aşağıda verilmiştir [19].

Buharın genişlemesine (hareketine) göre:

- Aksiyon (impulse) türbinleri
- Reaksiyon türbinleri
- Karışık türbinler (Reaksiyon+Aksiyon)

Giriş basınçlarına göre:

- Düşük basınç türbinleri
- Orta basınç türbinleri
- Yüksek basınç türbinleri
- Süper kritik basınç türbinleri

Isı düşüş proseslerine göre:

- Kondensasyon türbinleri
- Ara buhar almalı kondensasyon türbinleri
- Karşı basınç türbinleri
- Ara buhar almalı karşı basınç türbinleri
- Öncü (topping) türbinler

Kullanım yerlerine göre:

- Sabit hızlı stationary türbinler
- Değişken hızlı stationary türbinler

Kontrol yöntemlerine göre:

- Kısmi reglajlı
- Nozul reglajlı
- Bypass reglajlı

3.2 Buhar Türbinleri İçin Dizayn Şartları ve Dizayn Dışı Koşullar

Üretilen her bir kW güce karşılık gelen özgül ısı miktarının en düşük olduğu yani maksimum verimin elde edildiği çalışma koşulları bir türbin için en ekonomik koşul olarak adlandırılır. Bu nedenle türbinler tasarlanırken sistemin termik veriminin maksimum olacağı koşullar göz önünde bulundurulmaktadır. Türbin kapasiteleri

türbinin boшта çalışmasından tam yükte çalışmasına kadar çok geniş değer aralıklarında çalışabilmelidir [19].

Türbinler bazı özel koşullar göz önünde bulundurularak dizayn ve imal edilirler. Her bir kesitin kanat profili ve geometrik ölçüleri, türbin giriş ve ara kızdırma parametreleri (basınç ve sıcaklık), özgül buhar debisi, mevcut entalpi düşüşü, özgül kondenser basıncı, özgül ara buhar oranları, özgül dairesel frekans gibi özel koşullar için belirlenir. Bunlara ek olarak rotor çapı, ilk ve son kanatın yüksekliği, türbindeki basamak sayısı ve tesisin temel aldığı termodinamik çevrim de dizayn şartlarında belirleyici parametreler olarak kullanılır.

Yukarıda bahsi geçen koşullar buhar hızının, hız üçgenlerinin yapısının, reaksiyon derecesinin, basamak ve türbin verimin belirlenmesinde esas alınmaktadır. Dizayn koşullarında işletilen bir sistemde optimum giriş ve çıkış şartları, optimum hatve/kanat genişliği (pitch/chord ratio) oranı, optimum kanat yüksekliği ve kanat açıklık (aspect ratio) oranı ve kanat hız oranı dolayısıyla kayıplar en aza inecektir.

Dizayn koşullarında kayıpların en az olmasına rağmen gerçek çalışma koşullarında, işletme süresince, dizayn parametreleri ile çalışmak neredeyse imkansızdır. Gerçek koşullar çoğu zaman kontrol dışı olarak gerçekleşir.

Dizayn dışı koşullar (kısmi yük koşulları) dahili ve harici birçok etken tarafından oluşturulabilir. Dahili koşullar genelde kontrol edilebilirken harici koşullara müdahale şansımız oldukça düşüktür. Dizayn dışı koşulların oluşmasına neden olan ve türbinin kesit performansını düşüren bazı koşullar aşağıda listelenmiştir [15].

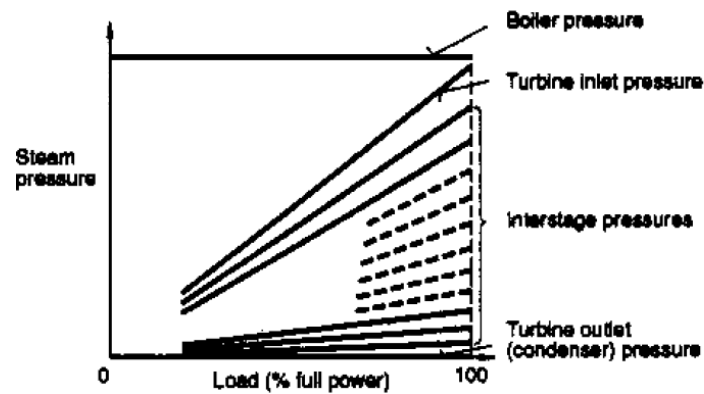
- Türbin girişindeki buharın özelliklerindeki değişim
- Kısmi yüklerde çalıştırma
- Şebeke frekansının değişimi
- Soğutma suyunun sıcaklık ve debisindeki değişimlere bağlı olarak kondenser basıncının değişmesi
- Kısmi üfürme
- Besleme suyu ön ısıtıcısının performansındaki değişimler
- Buhar yolunun deforme olması
- Buhar yolunda tortu birikmesi

- Buhar yolunun hassasiyetinin değişmesi
- Ardışık basamak (cascade) geometrisinde ve profilinde meydana gelen bozukluklar
- İç kayıplar (sabit ve hareketli kanat, çıkış, aralık kaçak, rüzgarlama ve sürtünme kayıpları)

KISMİ YÜK ŞARTLARI

4.1 Kısmi Yüklerde Buhar Türbinlerinin Çalışma Prensipleri

Kısmi yüklerde türbine doğru olan buhar akışı gavernör (düzenleyici) vanalar (kontrol vanası) vasıtasıyla ayarlanır. Türbine gönderilen buhar debisi/oranı azalırken türbin girişindeki buhar basıncı da azalır. Bunun sonucunda ara kesitlerdeki basınçlar da azalır. Çok küçük yükler hariç tüm ara kesitlerdeki basınçlar türbin yükü ile orantılıdır, örneğin %70'lik bir yükte ara kesitlerdeki basınç değerleri tam yükteki basınç değerinin yaklaşık olarak %70'i olmaktadır (Şekil 4.1). Türbin çıkış basınçları (yaklaşık olarak kondenser basıncına eşittir) türbindeki yük değişimlerinden oldukça az etkilenirler ve işlemlerde kolaylık sağlaması açısından tüm yük değerlerinde sabit kaldığı varsayılır.



Şekil 4. 1 Basınç ve debi ilişkisi [20]

Türbin yükü ve ara kesitlerdeki basıncın orantısal olması çeşitli yalıtım durumlarının ve drenenaj ya da hava firar valflerinin kontrol edilmesinde yaygın olarak kullanılır.

Belirlenen türbin yüklerinde sistemin iyi bir şekilde çalışabilmesi için bu valflerin uygun miktarlarda açılıp kapatılması gereklidir. Bu valflerin kontrolü yapılırken türbin yükünü ölçmek yerine türbin basıncı ölçülerek işlemler yapılır [20].

Bir türbinin kesit performansının azalmasında Bölüm 3'te bahsedilen birçok parametre etkili olmaktadır. Bunlardan en önemlilerinden birisi ise sistemin kısmi yük şartlarında çalıştırılmasıdır ki bu da türbin kanatlarına çarpan buharın hızını ve yönünü belirleyen akım hatlarının oluşumuna etki etmektedir.

Kanat hızı ve şekli sabit kalırken onu en iyi bir şekilde karşılayabilecek tek bir akım hattı mevcuttur. Kanat ve buharın en uygun şekilde çalışmasıyla türbin kesitleri de maksimum performans değerlerine ulaşmış olur. Akım hattında meydana gelecek en küçük bir sapma dahi kesitlerin verimini azaltacaktır [20].

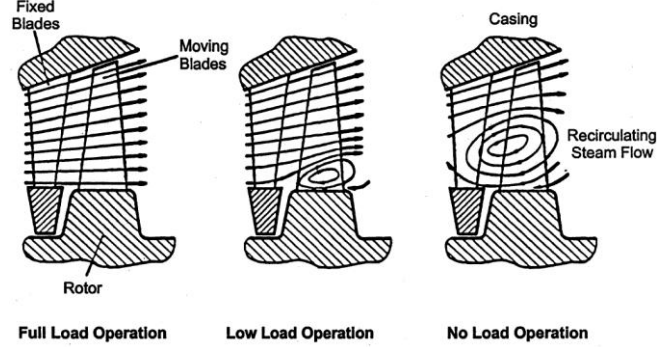
Verim düşüşünü karşılamak içinse ya daha fazla yakıtın yakılması gerekir ya da güç çıktısının azaltılması ki her iki seçenekte uzun dönemli çalışmalarda maliyetleri oldukça arttırmaktadır.

Türbin içerisindeki buharın akım hattı buharın hızına ve dolayısıyla da kinetik enerjisine bağlıdır. Kinetik enerji ise ısı enerjisinden dönüştürülerek elde edilmektedir bu nedenle birim kütle başına düşen ısı miktarının az olması buhar akımının da daha yavaş olmasına neden olacaktır.

Mevcut kullanılabilir ısı yüksek oranda düştüğünde kanatları hareket ettirmekle görevli buharın hızı da düşecektir. Hızı düşen buhar da tekerlek hızını yavaşlatarak kanatlarda türbülans oluşumuna neden olacak ve bu da rüzgarlama kaybı olarak bilinen sürtünme kayıplarını arttıracaktır. Bu kayıplar kanatların yüksek hızı göz önünde bulundurulduğunda oldukça önemli olmaktadır [20].

Tüm bu etkiler buharın her bir kilogram başına sahip olduğu ısı miktarının etkisiyle açıklanabilir yani daha az türbin yükü kilogram başına daha az ısı demektir. Tüm kademeler sabit basınç oranı ile çalışırsa kilogram başına sahip oldukları ısı kapasiteleri değişmez. Bu nedenle bu kademelerdeki akım hattı bozulmaz ve böylece verimleri de neredeyse sabit kalır. Ancak, türbin son kesitindeki basınç oranı ve buna bağlı olarak ısı kapasitesi türbin yükü azaldığında azalmaktadır. Akım hattındaki bozulma Şekil 4.2'de aşama aşama gösterilmiştir.

Düşük yüklerde veya yüksüz durumlarda türbindeki akışkan miktarı oldukça düşmektedir. Çıkış basınçlarının türbin yükü ile değişmediği varsayıldığı zaman son kesitlerde basınç değişmez ve bu da hacimsel debinin belirgin bir şekilde azalmasına neden olmaktadır [20].



Şekil 4. 2 Farklı yüklerde akım hattında meydana gelen değişiklikler [20]

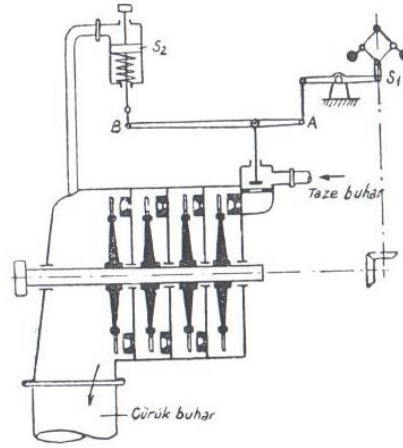
Çok düşük yüklerde akım hattı bozulması o kadar çoktur ki bu kesitlerden alınacak güç çıktısını (MW cinsinden) ve verimi sıfıra kadar düşürmektedir. Bu durum *kesitte akım boğ(ul)ması* olarak adlandırılır. Boğulma olayı türbin yükünün gecikmesine ve kesit girişindeki basıncın azalmasına neden olur ki bu da sondan ikinci kesitteki basınç oranını etkiler. Bu nedenle, son kesitte bu olaylar olurken, türbin yükü azaldığında kesit güç çıktısı ve verimi de azalır. Aynı zamanda son kesitteki akım koşulları daha da kötüleşir ve rüzgarlama kayıpları nedeniyle diğer kesitlerde üretilen gücü de harcamaya başlar [20].

Türbin yükünün daha da düşmesi türbin içerisinde karşı akımın çoğalmasına neden olur. Yüksüz ve normal hız şartlarında türbindeki son kesitlerden bazıları geri kalan kesitlerle birlikte çalıştırılır ve meydana gelen sürtünmeler nedeniyle de üretilen mekanik gücün bir kısmı harcanır.

Sonuncu kesitlerdeki akım hattı bozulması türbin veriminin azalmasının yanında işletmeyle ilgili birçok sorunu da beraberinde getirir. Bunlardan ilki, büyük rüzgarlama kayıpları çok miktarda ısı üretir ve düşük basınç türbini çıkışında aşırı ısınmayı önlemek için özel bir soğutma sistemi kullanılmalıdır. İkincisi ise bozuk akım türbülans oluşturacaktır ve bu da kanat titreşimine neden olur. Ayrıca akım hattının bozulmasına neden olan son kesitlerdeki basınç oranını düşürdüğü için zayıf bir kondenser vakumu da bu olumsuzlukların artmasına neden olur [20].

Kullanım amaçlarına göre türbinlerin kondensasyonlu, ara buhar almalı, karşı basınçlı oldukları önceki bölümlerde ifade edilmişti. Farklı çalışma karakteristiklerine sahip bu türbinlerin kısmi yük şartlarında işletilmeleri de birbirinden farklılık göstermektedir.

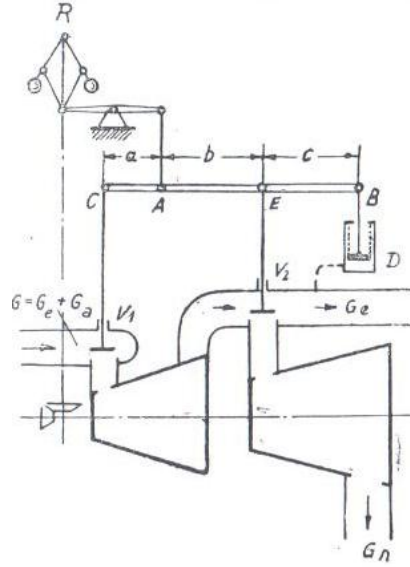
Karşı basınç türbinlerinde gerçekleşen entalpi değişimleri, kondensasyonlu türbinlere göre daha küçük olduğu için, türbin giriş basıncındaki değişiklikler oldukça önemlidir. Bu nedenle karşı basınç türbinlerinde genelde nozul reglajı veya karmaşık reglaj ile kontrol sağlanabilir.



Şekil 4. 3 Karşı basınçla çalışan türbinlerde reglaj prensibi [21]

Bir karşı basın türbini tek başına çalıştığında sistemin kontrolü buhar debisini ayarlayan devir regülatörü tarafından yapılır. Türbinden çıkan ve düşük basınç türbinlerine veya sistemdeki diğer elemanlara gönderilen buharın sabit bir basınçta kalması ya basınç regülatörü ya da emniyet valfi kullanarak sağlanır. Emniyet valfi kullanılırsa sistem, kondensasyon türbinlerindeki gibi, sadece devir regülatörü tarafından kontrol edilmiş olur [21].

Ara buhar çekilen türbinlerde yapılan reglaj işlemleri hem gerekli yüke karşılık gelen gücü hem de ısıtma işlemleri için gerekli buhar miktarını sağlaması gerekir. Bu nedenle böyle bir sistem, gücü kontrol eden bir devir regülatörü ve çekilen ara buharı kontrol eden bir basınç regülatörü tarafından kontrol edilebilir [21].

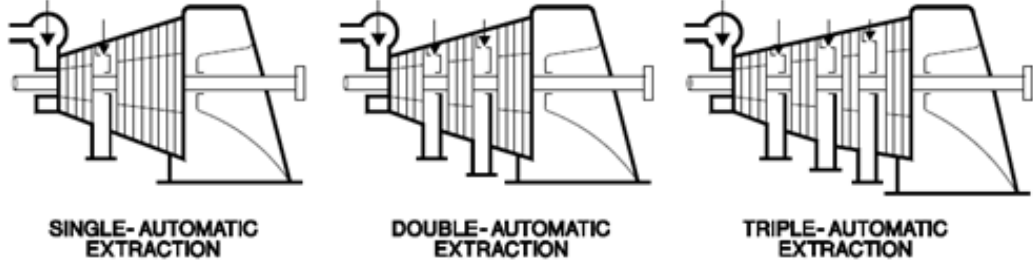


Şekil 4. 4 Ara buhar çekilen türbinlerde reglaj prensibi [21]

Sistemi kontrol eden bu mekanizmalar çekilen ara buhar miktarına göre gücün veya değişken güce göre çekilen ara buhar miktarının değişmemesini sağlamalıdır. Bu nedenle kondensasyonlu ve ara buhar çekilen bir türbinin aşağıdaki hususları yerine getirmesi gerekir [21].

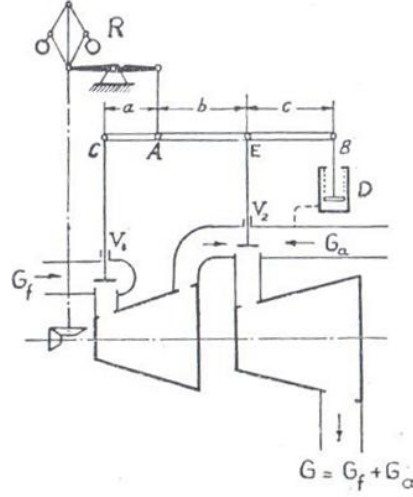
- Çekilen ara buhar miktarının sabit kaldığı ancak, türbin yükünün değiştiği durumlarda hem taze buhar valfi hem de ara buhar valf(ler)i aynı yönde hareket ederek yük arttıkça valfleri açıp azaldıkça valfleri kapatmalıdır.
- Türbin yükünün sabit kaldığı ancak, çekilen ara buhar miktarının değiştiği durumlarda taze buhar valfi ile ara buhar valf(ler)i zıt yönlerde hareket etmelidir ki ara buhar miktarı azaldığı zaman yükselen basıncı karşılamak taze buhar valfinin bir miktar kapanmasını ve ara buhar valfinin de bir miktar açılmasını sağlayabilsin.

Ara buhar almalı buhar türbinlerinde tam yükte çalışılsa dahi çekilen ilk arabuhardan sonraki kademelerde türbin *kısmi yüklüymüş* gibi çalışacaktır. Bu olumsuzluğu giderebilmek içinse ara buhar çekildikten sonraki kademelerin kanat boyutları dizayn aşamasında hesaplanarak daha küçük boyutlarda imal edilmekte ve sistemin de buna karşılık sanki tam yükte çalışıyormuş gibi davranış göstermesi sağlanabilmektedir.



Şekil 4. 5 Türbinlerde ara buhar çekme çeşitleri (Woodward)

Yalnız taze buharla çalışan bir yüksek basınç türbininden ve gerektiğinde çürük buharla çalıştırılan alçak basınç türbininden oluşan çift basınçlı türbinler hem taze hem de çürük buharla çalışıp güç üretebilmektedirler [21].



Şekil 4. 6 Çift basınçlı türbinlerde reglaj prensibi [21]

Çift basınçlı bir türbinde çürük buhardan mümkün derecede faydalanılmalı ve yükün düştüğü durumlarda öncelikle taze buhar kısılmalıdır. Bu nedenle çift basınçlı bir türbin aşağıdaki işlemleri gerçekleştirebilmelidir [21].

- Çürük buhar basıncının sabit kaldığı ancak, türbin gücünün değiştiği durumlarda devir regülatörü hem taze hem de çürük buhar valflerini kumanda etmelidir.
- Türbin yükünün sabit kaldığı ancak, çürük buhar basıncının değiştiği durumlarda devir regülatörünün hem taze hem de çürük buhar valflerini zıt yönde kumanda edebilmelidir.

4.2 Yük Ayarlama Yöntemleri, Mekanizmaları ve Modelleri

4.2.1 Yük Ayarlama Yöntemleri

Elektrik şebekelerinde ve güç tesislerinde ihtiyaç duyulan güç miktarı her zaman sabit olmamaktadır ve bu nedenle de bir enerji tesisi her zaman dizayn şartlarında çalışmamaktadır. Türbin gücünün o esnada işletmede mevcut yüke uydurulmasına reglaj denir. Reglaj hem sarfiyat hem de işletmecilik bakımından önemlidir. Gücün yüke göre ayarlanması olabildiğince çabuk olmalıdır [21].

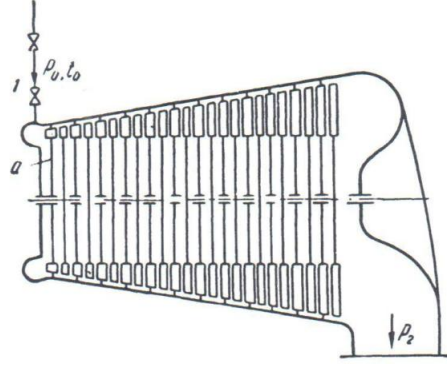
Buhar türbinlerinde güç, buhar debisi ve ısı düşüşüyle orantılıdır. Bu nedenle iki büyüklükten birini ya da ikisini birden değiştirerek gücü ayarlamak mümkündür [22]. Bunlara ek olarak değişken çıkış basınca sahip kazanlar kullanılarak da türbin güçleri ayarlanabilmektedir.

4.2.1.1 Kısılma Reglajı

Kısılma reglajında buhar tüm nozullara tek bir valften aynı anda gönderilir. Nozula buharın gönderilmesi bir ya da iki kısılma valfi tarafından kontrol edilebilir. Yüksek sıcaklığa ve basınca sahip buharın kullanıldığı yüksek kapasiteli türbinlerde ise her birinde kısılma valfinin olduğu ikiden fazla ana valf bulunabilmektedir.

Taze buharın türbine tek bir valften gönderilmesi durumunda eğer türbin yükü tam ise buharın tamamı bu valften geçecektir. Kısmi yük koşullarında ise kısılma valfi kısmi olarak açılmakta, türbini besleyen buharın miktarında ve ısısında düşüşler olmakta ve bu da verimi düşürmektedir [19].

Kısılma reglajında spesifik buhar sarfiyatı ısı düşüşü (h_t) ve verimle (η_e) alakalıdır. Kısılma reglajı ara yüklerde h_t ve η_e değerlerinin azalmasından dolayı diğer türlere göre daha az ekonomik olarak görülmesine rağmen daha basittir ve ısı düşüşü nedeniyle oluşan kaybın kızdırma sıcaklığını yükselterek ve kondenser basıncını düşürerek telafi edilebilmesinden ötürü kullanışlı olmaktadır. Diğer taraftan da valften geçen buhar miktarının biraz azalması bu kaybı bir miktar daha azaltmaktadır.

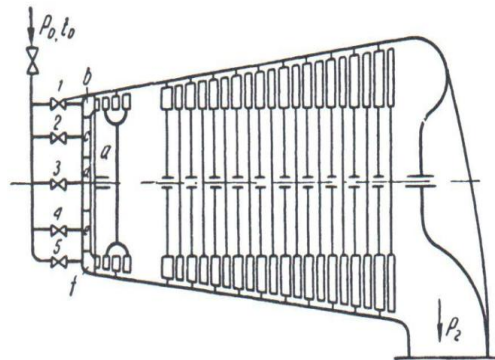


Şekil 4. 7 Kısılma reglajı [19]

Kısılma neticesinde türbin içindeki buharın hızının azalacağı ve u/c_1 oranının da daha uygun bir değere geleceğinden dolayı kısılma reglajında türbin içindeki bazı kayıpların da azaldığı görülmektedir. Farklı basamaklarda buharın özgül ağırlığının artmasından dolayı rüzgarlama, tekerlek sürtme ve aralık kayıpları da azalacaktır. Ancak, kondensere gelen buhar miktarının azalması kondenser vakumunu yükseltecek ve kanat sırtlarında girdapların oluşmasına sebep vererek kanat kayıplarının bir miktar artmasına neden olacaktır [21].

4.2.1.2 Nozul (Meme) Kontrol Reglajı

Meme reglajı ile çalışan bir türbinde taze buhar, birinci basamak önündeki durumunu korur. Bu nedenle, kondenser basıncının bir miktar azalması ihmal edilirse, türbin içindeki adyabatik ısı düşüşü aynı kalmış olur. Burada yükün değişmesi, mevcut meme kesitlerinden bir kısmını daha devreye sokmak veya devreden çıkartmak; yani türbine giren buhar miktarını çoğaltmak veya azaltmak suretiyle temin edilebilir. Kontrol sisteminde yer alan her bir nozul kendi grubunu beslemektedir [21].



Şekil 4. 8 Nozul (meme) reglajı [19]

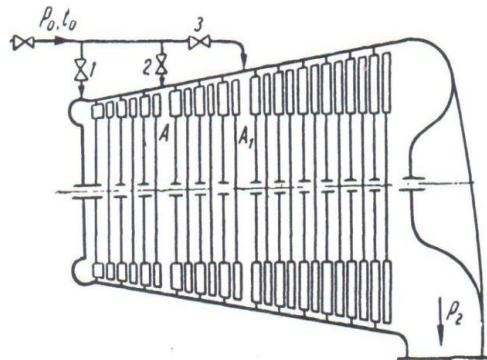
Türbindeki yük değiştiğinde nozul valfleri ihtiyacı karşılamak için belirli bir düzende açılır veya kapatılır ve böylece türbindeki yük değişimiyle birlikte kısmi genişlemenin derecesi de değişir. Eğer bu düzenleyici valfler kısmen açık ise kısma işlemi kısılma reglajı gibi meydana gelmektedir ancak, kayıplar göz önünde bulundurulduğu zaman, genişleyen buharın tüm özellikleri her iki yöntemde de aynı olursa, kısılma reglajından daha verimli olmaktadır. Nozul kontrollü türbinlerin verimleri, kısılma reglajına göre, değişken yüklerde daha kararlı olmaktadır [19].

4.2.1.3 Karışık reglaj

Kısılma ve meme reglajlarının birlikte kullanılmasıyla kontrolü sağlanan sistem, genelde, %50 yüke kadar kısılma reglajı ile daha yüksek yükler ise meme reglajı ile kontrol edilir. Yani karmaşık reglajda, türbinin nispeten daha nadir karşılaştığı yükler için, meme reglajına göre daha basit olan, kısılma reglajı seçilmektedir. Kısılma valfinin önünde bulunan memeler daima açıktır. Daha yüksek yüklerde ise sırasıyla meme grup valfleri açılmaya başlar. Meme grup valflerinin sayısı ne kadar fazla olursa, farklı yüklerdeki türbin verimleri de o kadar yüksek olur [19].

4.2.1.4 Bypass Reglajı

Elektrik ihtiyacının yoğun olduğu sabah ve akşam saatlerinde artan ihtiyacı karşılamak için, kısa süreli de olsa, türbin yükünün artırılması gerekebilir. Böyle bir durumda türbin *aşırı veya üst yükleme* şartlarında çalışmaktadır. Üretilen gücün artmasına rağmen, belirli bir değerden sonra, aşırı yüklemelerde de kısmi yüklerde olduğu gibi indike ve termik verim düşer [21].



Şekil 4. 9 Bypass reglajı [19]

Türbinin fazla yüklenmesi istendiğinde devreye alınan ve çürük buharın kullanılmasına olanak sağlayan bir kontrol mekanizmasıdır. Bypass reglajı vasıtasıyla ihtiyaç duyulan fazla güç, sisteme ara kesitlerden çürük buharın gönderilmesiyle karşılanır. Ana girişten gelen taze buharla karışan çürük buhar ara kesitten sonraki debi ve basınç miktarını arttırır. Artan debi ve basınç da, çürük buhar enerjiye dönüştürülebildiği için, daha fazla güç üretimi ve verim artışı sağlayacaktır. Kısmi reglajında olduğu gibi bypass reglajı da yükün çok hızlı bir şekilde, saniyede %1 gibi, değişmesini sağlayabilmektedir [23].

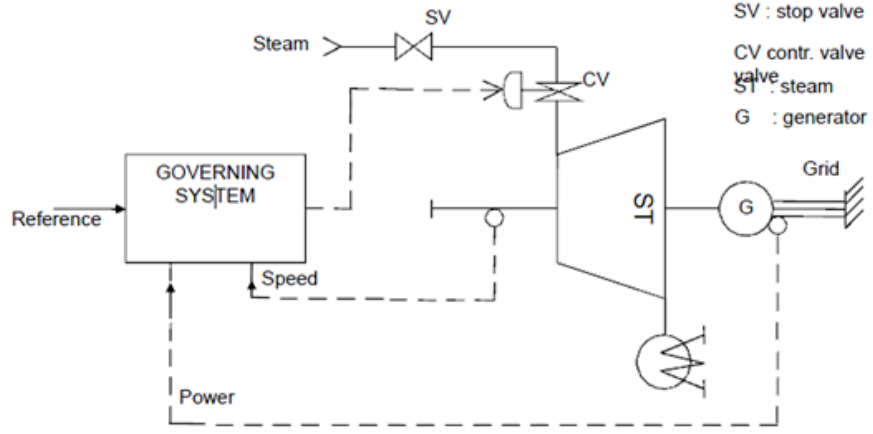
Yukarıda bahsedilen kontrol yöntemlerine ek olarak birbirine bağlı olarak çalışan, birbirlerinin yüklerine yardım eden ve komşu şebekeler yardımıyla kendi şebekesini besleyen güç tesislerindeki türbinlerde buhar miktarını ayarlayarak gücü sabit bir değerde tutabilmek için kullanılan *güç regülatörleri* ve türbinden alınan buharın veya bunun çalıştırdığı makinenin basıncını sabit tutabilmek için *basınç regültörleri* de kullanılmaktadır [21].

4.2.2 Yük Ayarlama Mekanizmaları

Değişkenlik arz eden talep edilen güç miktarı ile türbinin ürettiği güç arasında ortaya çıkan dengesizlikleri gidermek için bir ayar mekanizmasına ihtiyaç vardır. Türbine giren buhar miktarını kontrol ederek türbinin hızını sabitlemek istenilen senkron hıza göre ayarlayan elemanlara gavernör denir [24].

Hız ve/veya yük kontrolü, buhar türbini uygulamalarında sistemin güvenliği ve verimliliği açısından olmazsa olmazlardandır. Tüm türbin uygulamalarında kontrol için düzenlemeler genelde ilk olarak hız kontrolü üzerinden yapılır. Hız kontrolü olmaksızın ne sistem çalıştırılabilir ne de güvenli bir şekilde işletilebilir [25].

Jeneratör uygulamaları için türbini yük ile kontrol etmek hız ile kontrol etmekten daha caziptir. Bu tip sistemlerde jeneratörler genelde elektrik şebekesini beslerler. İlk aşamada jeneratör ile şebeke senkronize edilir, şalterler kapatılır ve türbinin rotasyonel hızı şebekenin frekansına bağlı olarak değişir. Buhar akımındaki değişim hızı değiştirmeyecektir ancak, bu değişime bağlı olarak daha fazla veya daha az miktarda enerji üretilecektir [25].

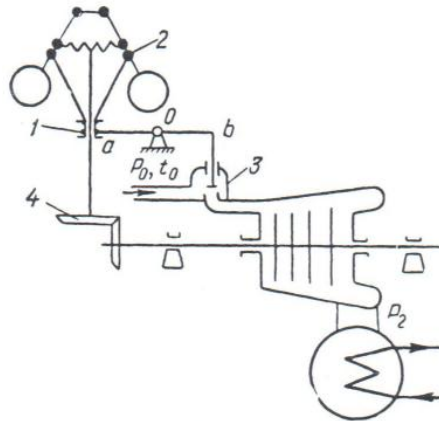


Şekil 4. 10 Bir kontrol mekanizmanın genel görünümü [24]

Ülkemizdeki endüstriyel türbinlere bakarsak çoğunlukla mekanik ve hidrolik gavernör tiplerini görürüz. Yeni türbin sistemlerinde ise mekanik problemlerle karşılaşmamak ve veri izlemesi yapabilmek için servomotor tahrikli gavernörler de kullanılmaktadır. Böylece kontrol odasına online veri gönderimi ve hassas kontrol sistemi sağlanmaktadır [26].

4.2.2.1 Direk Kontrol Sistemleri

Regülatör manşonunun hareketlerini doğrudan reglaj valfine aktaran sisteme *direk reglaj* denir. Bu kontrol mekanizmasında regülatör manşonun oluşturacağı kuvvetler oldukça düşüktür. Bu nedenle büyük güçlü türbinlerden ziyade küçük güçlü türbinleri kontrol etmekte kullanılırlar [21].



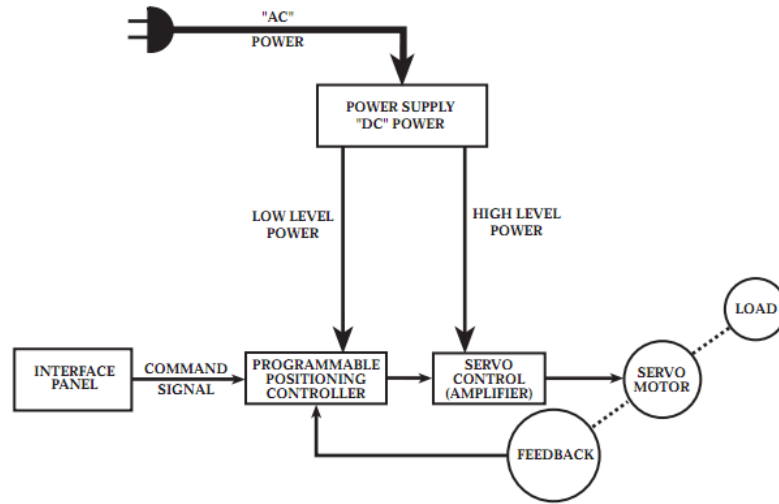
Şekil 4. 11 Direkt reglaj [19]

4.2.2.2 Servomotorlu Kontrol Sistemleri

Servomotorlu reglajda da düzeneği harekete geçirme işlemi regülatör tarafından yapılır. Bu regülatör: merkezkaç kuvvetinin tesiriyle çalışan bir devir regülatörü; karşı basınç veya çalışma makinesinin bastığı maddenin basıncıyla çalışan bir basınç regülatörü olabilir. Devir regülatörü kullanıldığı takdirde türbin gücü; basınç regülatörü kullanıldığı takdirde ise buhar veya madde basıncı birinci derecede rol oynar [21].

Regülatör manşonun hareketinin, kısilmareglajı yapıldığı takdirde reglaj valfine; nozul (meme) reglajı yapıldığı takdirde ise nozul valflerine aktarılması üç şekilde olabilir:

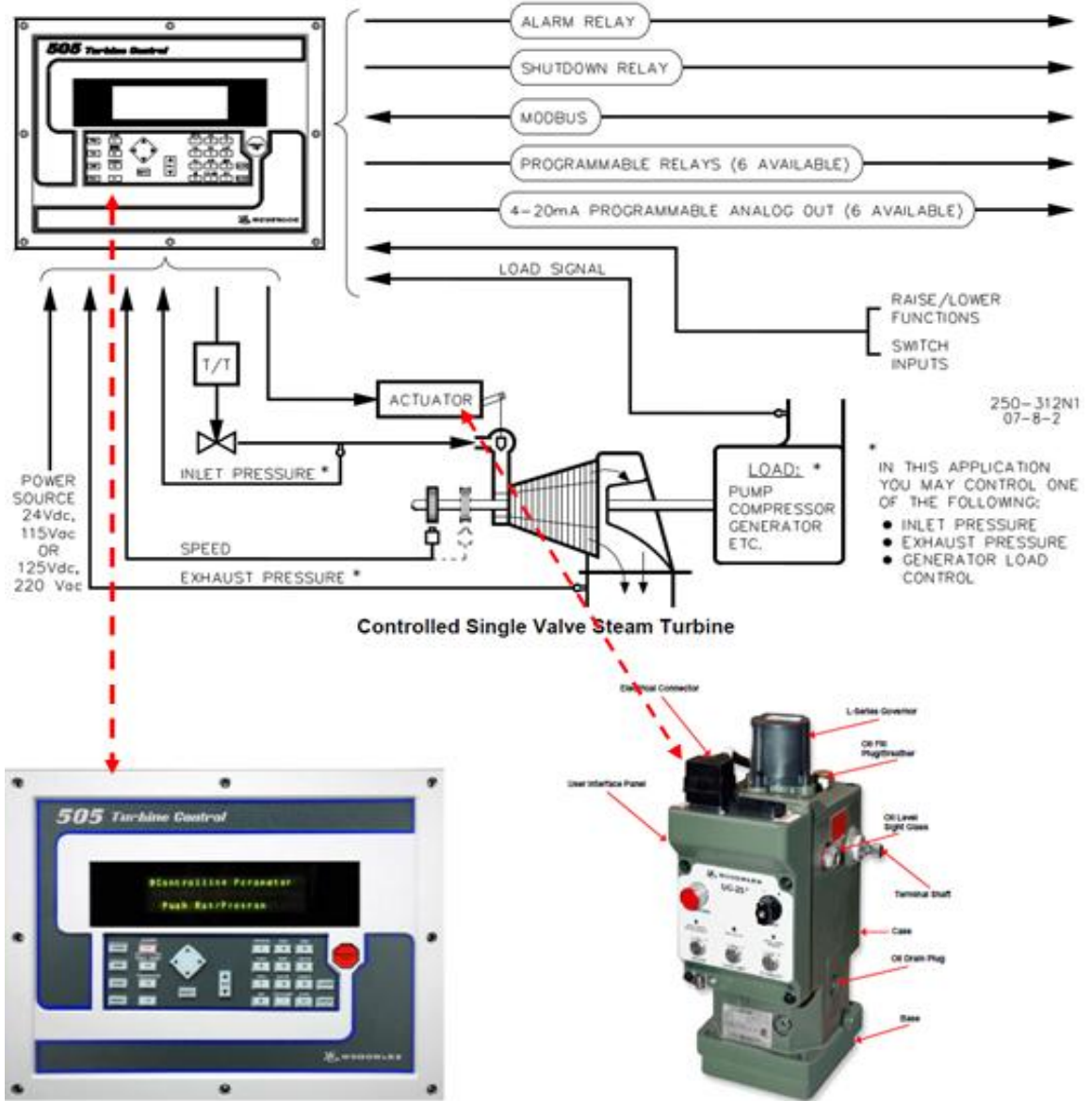
- Mafsallı kumanda çubukları ile mekanik olarak
- Basınçlı yağ ile yani hidrolik olarak
- Hem mekanik hem de hidrolik olarak



Şekil 4. 12 Servo motor çalışma prensibi (Baldor)

4.2.2.3 Hidrolik Kontrol Sistemleri

Yaklaşık olarak 5 atü'lük yağ basıncı ile çalışan hidrolik reglajda seçilen tipe göre reglaj veya meme grup valflerinin üzerinde birer silindir bulunmaktadır. Bu silindirlere her biri, içindeki bir yayın gerilme kuvveti tarafından karşılanmaktadır. Bu iki kuvvet dengede olduğu müddetçe bu valf kapalı kalır. Silindir içindeki yağ basıncı düşürülür düşürülmez, yay kuvveti galip geleceğinden, piston aşağı doğru inerek valfin açılmasını sağlar [21].



Şekil 4. 5 Dijital kontrol sistemi (Woodward)

4.2.3 Matematiksel ve Termodinamik Model

Dizayn dışı koşullarda türbinin tamamının ve her bir kesitinin veriminde meydana gelecek değişimleri tahmin etmek için dizayn dışı koşullardaki termodinamik özelliklerin ve bunlara bağlı olarak ısı hesaplamaların bilinmesi oldukça önemlidir [20].

Önceki bölümlerde bahsi geçtiği üzere türbin yükündeki değişim entalpi düşüşü, hız oranını (u/c) ve reaksiyon derecesi gibi parametreleri etkilemekteydi. Yük değişimleri, türbinin her bir kesitindeki entalpi düşüşlerini ayrı ayrı etkilemekte ve bu da buharın kanatlara giriş ve çıkışındaki mutlak ve bağıl hızlarını değiştirmektedir. Bu durumsa

kanat sırtında akımın gecikmesine ve hareketli kanat sırasında kayıpların artmasına neden olmaktadır.

Türbin performansının ve güç çıktısının nasıl değiştiği buhar basıncı, sıcaklığı ve debisi arasındaki ilişkiye dayanarak açıklanabilmektedir. Bu ilişkiyi açıklamada kullanılan dört önemli yaklaşım vardır ve bunlar farklı yüklerde türbinlerin nasıl davranacağı hususunda tasarımcılara fikir verirler. Bu yaklaşımlar:

- Güç çıktısı
- Entalpi düşüşü ile basınç oranı arasındaki ilişki
- Square yasası (Elips Yasası-Stodola Konisi)
- Schegliaev modeli

4.2.3.1 Güç Çıktısı

$$\text{Güç} = m\eta_{ri}h_0 \quad (4.1)$$

Formülde m buhar debisini, η_{ri} kanat verimini ve h_0 'da entalpi düşüşünü ifade etmektedir. Kanat verimi hız (u/c_1) oranına, entalpi düşüşü ise kanat girişindeki buharın sıcaklık ve basınç oranlarına bağlıdır.

4.2.3.2 Entalpi düşüşü ile basınç oranı arasındaki ilişki

Farklı yükleme durumundaki entalpi düşüş miktarı aşağıdaki denklem yardımıyla yaklaşık olarak tahmin edilebilir.

$$h_0 = \frac{k}{k+1}RT_1 \left[1 - \frac{P_2}{P_1} \right]^{\frac{k-1}{k}} \quad (4.2)$$

T_1 , giriş sıcaklığını (K); P_1 , kanat girişindeki basıncını; P_2 , kanat çıkış basıncını ifade etmektedir.

Bu yaklaşım hem bir türbinin tamamı hem bir kanat grubu hem de bir basamak için uygulanabilmektedir.

4.2.3.3 Square Yasası (Elips Yasası-Stodola Konisi)

İlk gaz türbinli jeneratörün mühendislerinden Slovak asıllı Alman bilim adamı Aurel Stodola 1927 yılında Steam and Gas Turbines isimli kitabında türbindeki debi ve basınç oranları ve akım benzerlikleri yardımıyla kısmi yük davranışlarını açıklamış ve bu verilerle Stodola Yasası (Elips Yasası) olarak bilinen denklemleri çıkartmıştır.

Stodola'nın yaptığı çalışma daha sonra Cooke [5] tarafından kontrol edilemeyen (non-controlled) genişleme prosesleri için uygulanmış ve sabit akım katsayısı (Φ) şeklinde tanımlanmıştır.

$$\Phi = \frac{m}{\frac{P}{v}} \text{ ya da } \Phi_T = \frac{m \bar{T}}{p} \quad (4.3)$$

Denklemden P ve T giriş basınç ve sıcaklıklarını ve v ise özgül hacmi ifade etmektedir. Bu model için non-controlled genişlemeli çok kademeli grupların tek bir nozuldaki akım benzerliği gibi görülebildiği esas alınmıştır. İncelenen her bir grup, i, için Stodola Elipsi akım sabit katsayısı ile alakalıdır.

$$\Phi_i \propto \sqrt{1 - \left(\frac{P_{2i}}{P_{1i}}\right)^2} \quad (4.4)$$

P_{2i} buharın genişlemeden hemen önceki statik basıncı ve P_{1i} ise her bir grubun girişindeki toplam basınçtır. 4.4'deki benzerlik aşağıdaki şekilde geliştirilebilir.

$$\frac{\Phi_i}{\Phi_{0i}} = \frac{\sqrt{1 - \left(\frac{P_{2i}}{P_{1i}}\right)^2}}{\sqrt{1 - \left(\frac{P_{02i}}{P_{01i}}\right)^2}} \quad (4.5)$$

Bu ifadeyi P basıncına göre düzenlersek

$$P_{2i} = \sqrt{P_{1i}^2 - m_i^2 T_i Y_{0i}} = P_{1i} \sqrt{1 - \frac{m_i^2 v_i}{P_{1i}} Y_{0i}} \quad (4.6)$$

eşitliği elde edilir.

Buradan Y_{0i} , Stodola Sabiti, aşağıdaki şekilde çıkarılır.

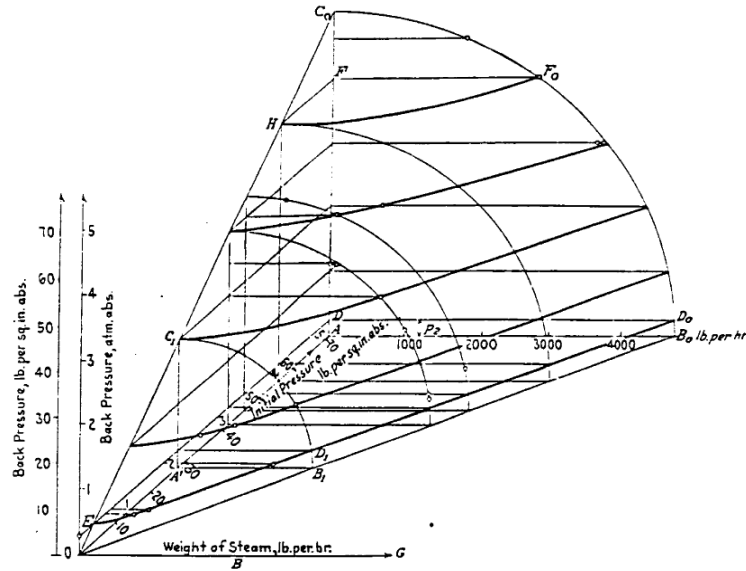
$$Y_{0i} = \frac{P_{01i}^2 - P_{02i}^2}{P_{01i}^2 \Phi_{0i}} \quad (4.7)$$

Stodola sabiti de sıcaklı ve debinin fonksiyonu olacak şekilde genişletilirse (4.8) elde edilir.

$$\frac{P_1^2 - P_2^2}{P_{01i}^2 - P_{02i}^2} = \frac{m^2 T_1}{m_0^2 T_{01}} \quad (4.8)$$

Eğer türbin kondensasyonlu ($P_2 \ll P_1$) ve sıcaklık değişimleri de önemsizse denklem (4.8) aşağıdaki gibi sadeleştirilebilir.

$$\frac{P_1}{P_{01}} = \frac{m}{m_0} \quad (4.9)$$



Şekil 4. 6 Stodola eğrisi [5]

4.2.3.4 Schegliaev Modeli

Bu model kısmi yüklerdeki ve dizayn koşullarındaki buhar debisi ile giriş ve çıkış buhar basınç oranları arasındaki ilişkiye dayanır. Nozul akış benzerliğini baz alan bu model Schegliaev tarafından buhar debisi (kg/s), basıncı (kPa) ve sıcaklığı (K) dikkate alınarak oluşturulan bu eşitlik şu şekildedir:

$$\frac{m}{m_D} = \frac{T_{1D}}{T_1} \frac{P_1^2 - P_2^2 - \sigma(P_1 - P_2)^2}{P_{1D}^2 - P_{2D}^2 - \sigma(P_{1D} - P_{2D})^2} \quad (4.10)$$

Eşitlikteki D dizayn koşullarını, 1 ve 2 alt indisleri ise her bir türbin grubundaki giriş ve çıkış şartlarını ifade etmektedir. Boyutsuz faktör σ ise kritik basınç oranına bağlı bir değerdir.

$$\sigma = \frac{\varepsilon_*}{1-\varepsilon_*} \text{ ve } \varepsilon_* = \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k}{k+1}} \quad (4.11)$$

Schegliaev'e göre ε_* değeri çok kademeli kondensasyon türbinlerinde 0.3'ten küçüktür ve $\sigma(P_1 - P_2)^2$ ile $\sigma(P_{1D} - P_{2D})^2$ ifadeleri yukarıdaki eşitlikte ihmal edilebilir. Çıkış basıncı P_2 de girişe göre küçük olduğundan yeni denklem şu şekilde sadeleştirilmiş olur.

$$\frac{m}{m_D} = \frac{P_1}{P_{1D}} \frac{\overline{T_{1D}}}{T_1} \quad (4.12)$$

Eğer $\varepsilon_* = \varepsilon_{crit} < 0.3$ ise 4.12 eşitliği diğer durumlarda ise 4.10 eşitliği kullanılır [1].

Matematiksel ifadeleri kullanarak tahmin yaptığımız yaklaşımların dışında teorik olarak sunulan ve bu üç madde ile bağlantısı olan yaklaşımlar mevcuttur. Bunlar:

- Başlangıç basıncındaki değişimler
- Ana buhar sıcaklığındaki değişimler
- Ara kızdırma sıcaklığındaki değişimler
- Kondenser basıncındaki (vakumdaki) değişimler

5.1 Örnek inceleme: Çan Termik Santrali

Çalışma prensiplerini ve teorik modelleri verilen kısmi yükleme durumları ya da dizayn dışı koşullar için hem sistemin termik verim değişimleri hem de türbinlerin indike verimlerindeki değişimler Çan (TR) termik santralleri üzerinden incelenecektir.

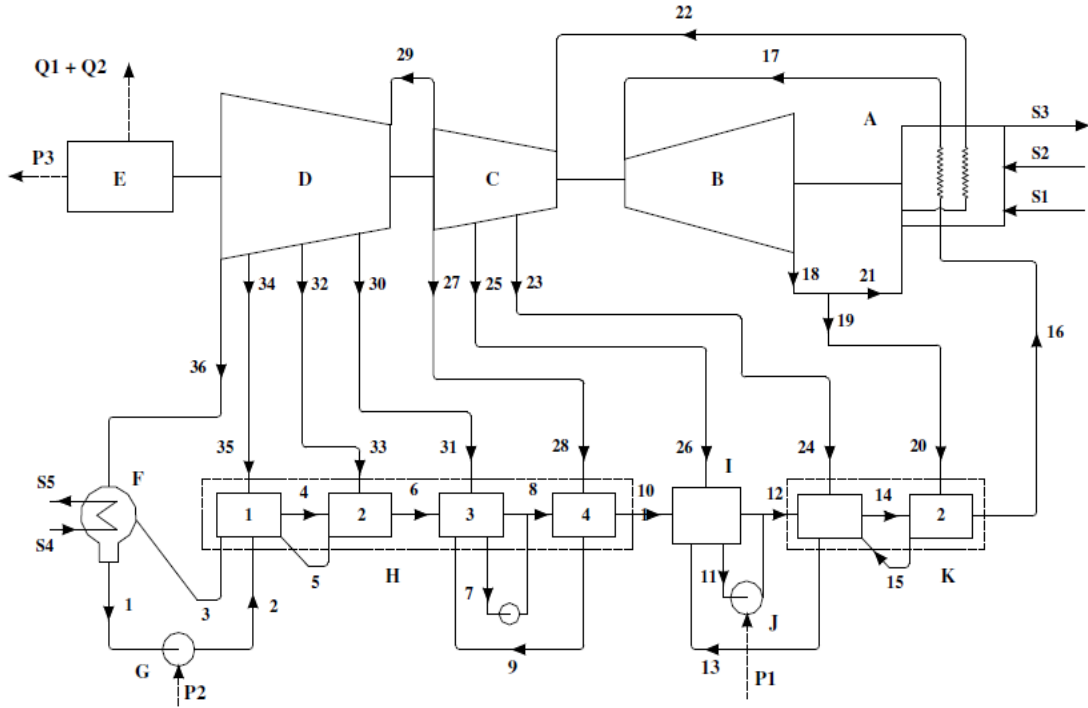
5.1.1 Çan Termik Santralinin Teknik Özellikleri

160 MW'lık iki üniteden oluşan ve I. ve II. ünitelerinin 2008 yılında kesin kabul edildiği Çan Termik Santrali, Çanakkale ilinin Çan ilçesinde yer almaktadır. Bölgede artan enerji taleplerini karşılayabilmek ve buradaki zengin linyit rezervlerinden yararlanmak için kurulan santral sahip olduğu akışkan yatak teknolojisi ve emisyon azaltıcı sistemler ile hem modern hem de çevreci bir tesistir [27].



Şekil 5. 1 Çan termik santrali [27]

2008 yılı verilerine göre ısı değeri 4368 kJ/kg olan yıllık 1.8 milyon ton linyit kullanan tesisin toplam güç çıktısı 320 MW, termik verimi %37 ve elektrik maliyeti 2.61 cent/kWh'dır. Tesise ait akış diyagramı Şekil 5.2'de verilmiştir [28].



Şekil 5. 2 Çan termik santrali akış diyagramı [28]

Örnek olarak incelediğimiz Çan termik santralinde reglaj işlemleri türbine gönderilen buhar debisinin değiştirilip türbin girişindeki buhar sıcaklığının ve basıncının sabit tutulduğu nozul (meme) reglaj yöntemi ile kontrol edilmektedir.

Tesisin kısmi yüklerdeki performans değerleri hesaplanırken imalatçı firma tarafından farklı yük koşulları için garanti edilen basınç, sıcaklık ve entalpi değerleri dikkate alınmış ve tüm işlemlerde bu değerler kullanılmıştır.

Yapılan analizlerde türbinler ara kademelerinden buhar çekilerek ısıtılan besleme suyu ön ısıtıcısı sayısı kadar parçaya ayrılarak incelenmiştir. Bu kapsamda yüksek basınç türbini tek, orta basınç türbini üç ve alçak basınç türbini ise dört kısma ayrılmış ve basınç, debi, entalpi düşüşü, güç üretimi, kayıp, indike verim değerleri için ayrı ayrı analiz edilmiştir.

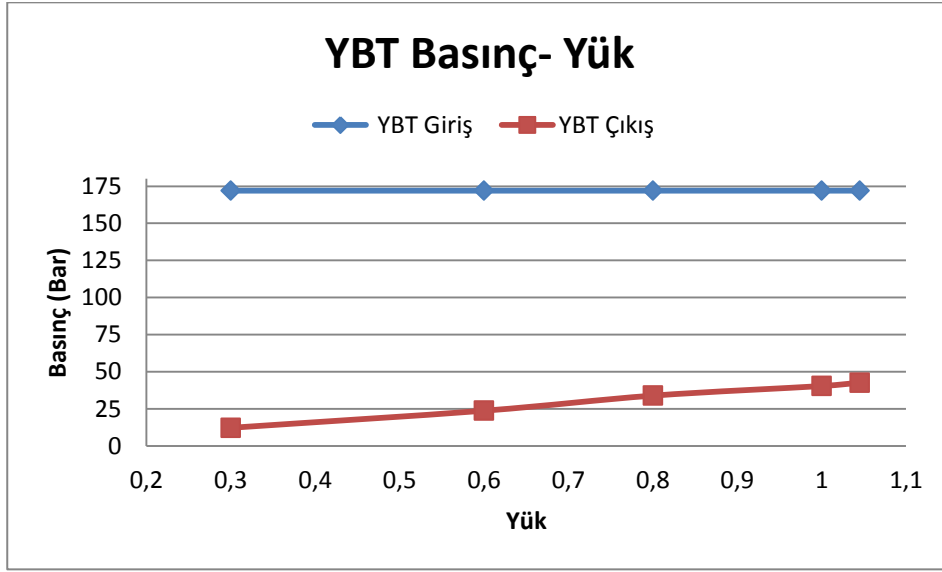
5.1.2 Kısmi yüklerde basınç ve debi değişimleri

Reglaj işlemleri esnasında istenilen yük miktarına göre türbin girişinde buhar basıncını değiştirerek yani kısma işlemi uygulayarak yük ayarlamaları yapılabilmektedir. Ancak böyle bir sistemde kayıplar oldukça fazla olacaktır. Bunun yerine türbin giriş sıcaklığının ve basıncının sabit tutulduğu ve istenilen yükün debi miktarını değiştirerek ayarlandığı kontrol yöntemi Çan termik santralinde ve diğer birçok santralde kullanılmaktadır.

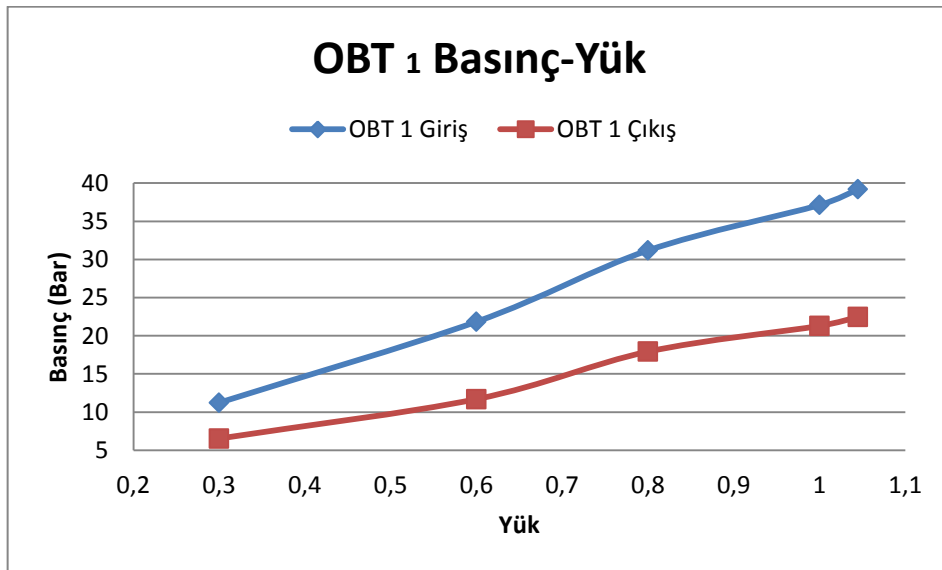
YBT girişindeki dizayn basıncının (172 Bar) sabit tutulduğu sistemde değişen yüklerle birlikte YBT, OBT ve ABT çıkış, OBT ve ABT giriş, YBT, OBT ve ABT ara buhar basınçları orantılı bir şekilde değişmektedir. Basınçlardaki değişim oranları ise hemen hemen yük miktarına eşit olmakta ve doğrusala yakın bir eğri oluşturmaktadır. Giriş basıncının sabit tutulmasıyla sağlanan tasarrufun bir kısmı kondenser vakumunun yükselmesinden dolayı kaybedilmektedir. Çizelge 5. 1 ile Şekil 5.3, 5.4 ve 5.5'te yük değerleri ve buna bağlı olarak her bir türbinin basıncında meydana gelen değişimler görülebilmektedir.

Çizelge 5. 1 Türbin giriş ve çıkış basınçlarının yüke göre değişimi

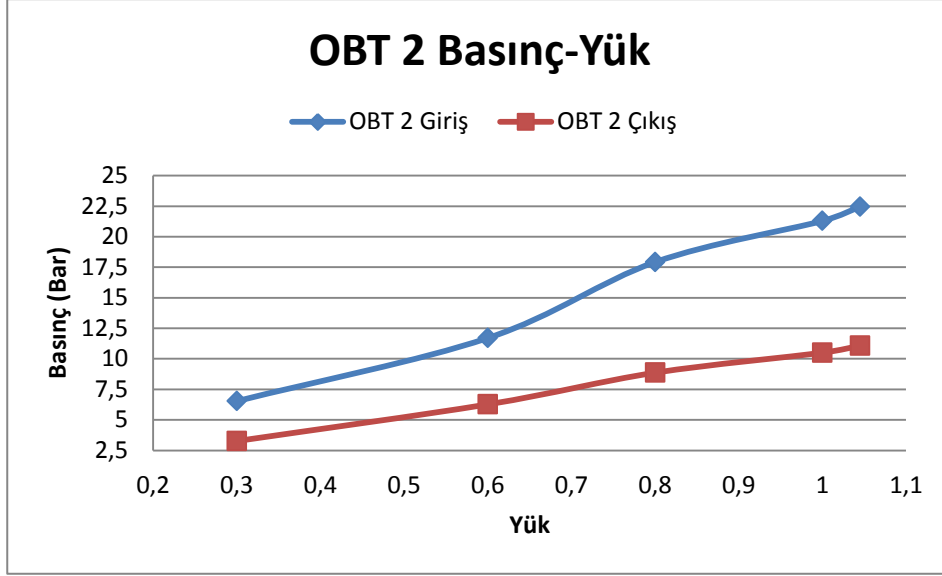
Yük	YBT		OBT		ABT	
	P _g (Bar)	P _ç (Bar)	P _g	P _ç	P _g	P _ç
1,047	172	42,6	39,19	5,489	5,489	0,0904
1	172	40,36	37,13	5,214	5,214	0,085
0,8	172	33,89	31,18	4,411	4,411	0,0737
0,6	172	23,74	21,84	3,134	3,134	0,058
0,3	172	12,21	11,23	1,644	1,644	0,041



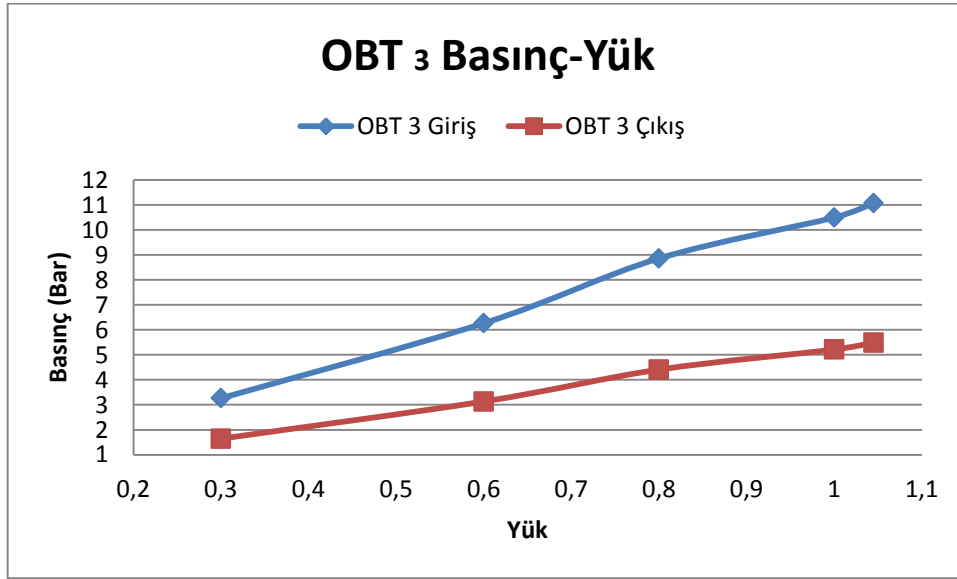
Şekil 5. 3 Basıncın yüke göre değişimi (YBT)



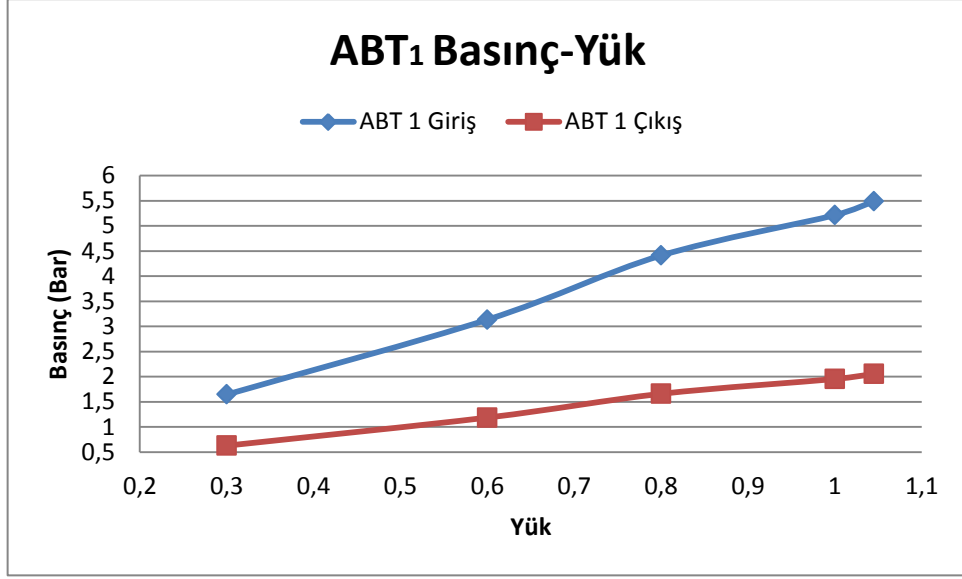
Şekil 5. 4 a) Basıncın yüke göre değişimi (OBT₁)



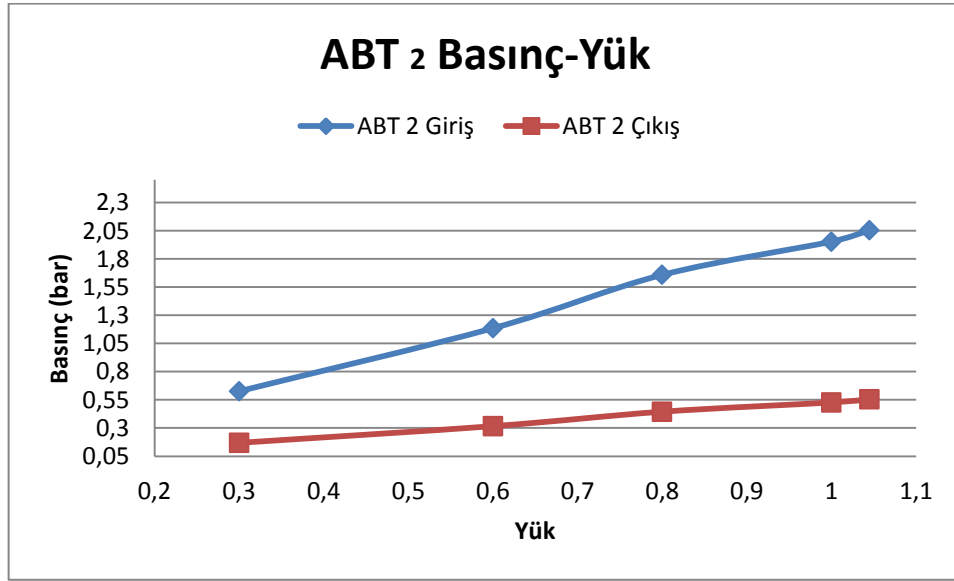
Şekil 5. 4 b) Basıncın yüke göre değişimi (OBT₂)



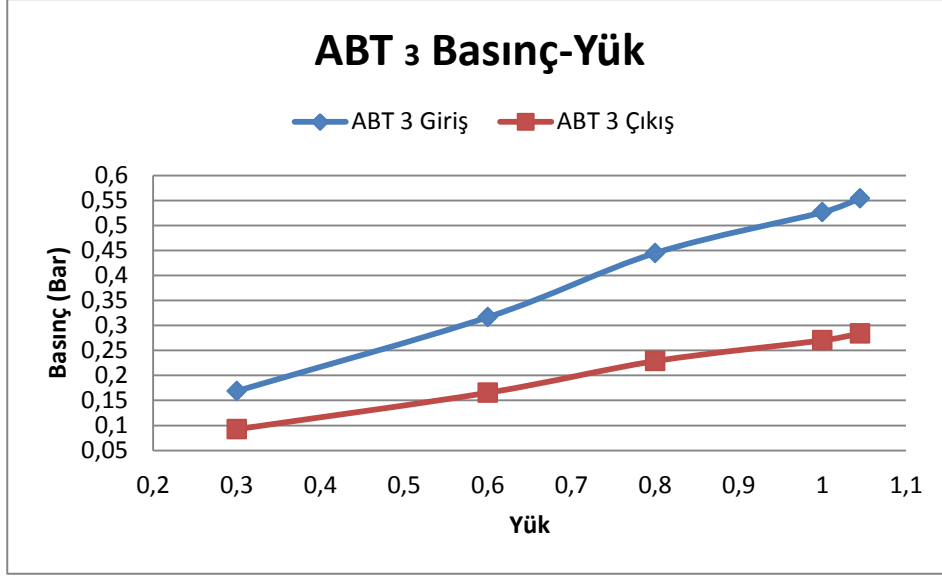
Şekil 5. 4 c) Basıncın yüke göre değişimi (OBT₃)



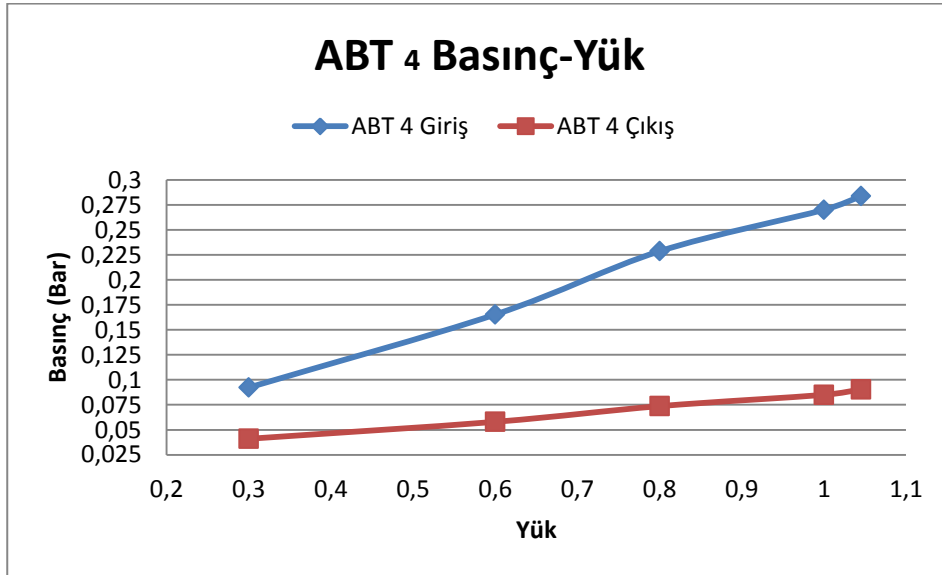
Şekil 5. 5 a) Basıncın yüke göre değişimi (ABT₁)



Şekil 5. 5 b) Basıncın yüke göre değişimi (ABT₂)



Şekil 5. 5 c) Basıncın yüke göre değişimi (ABT₃)

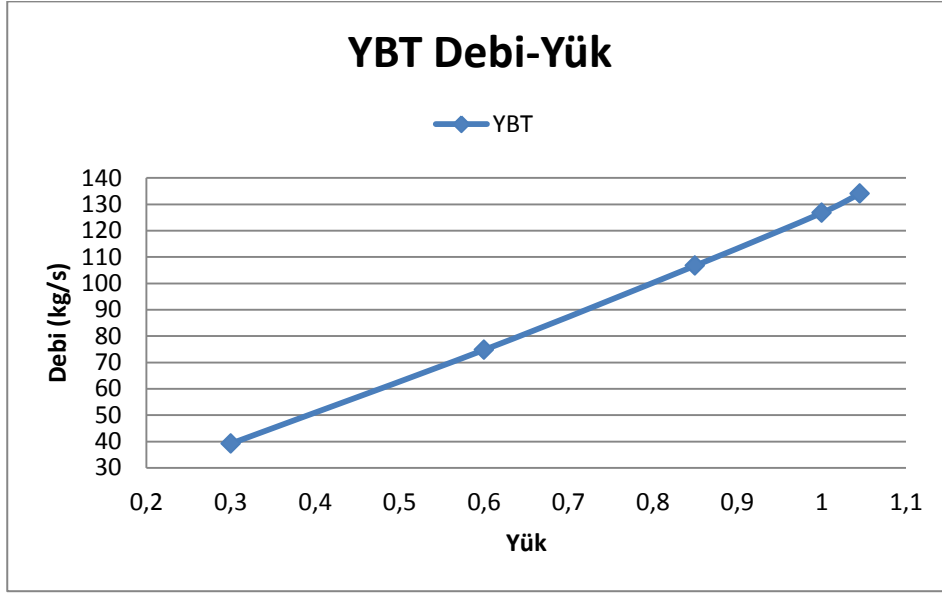


Şekil 5. 5 d) Basıncın yüke göre değişimi (ABT₄)

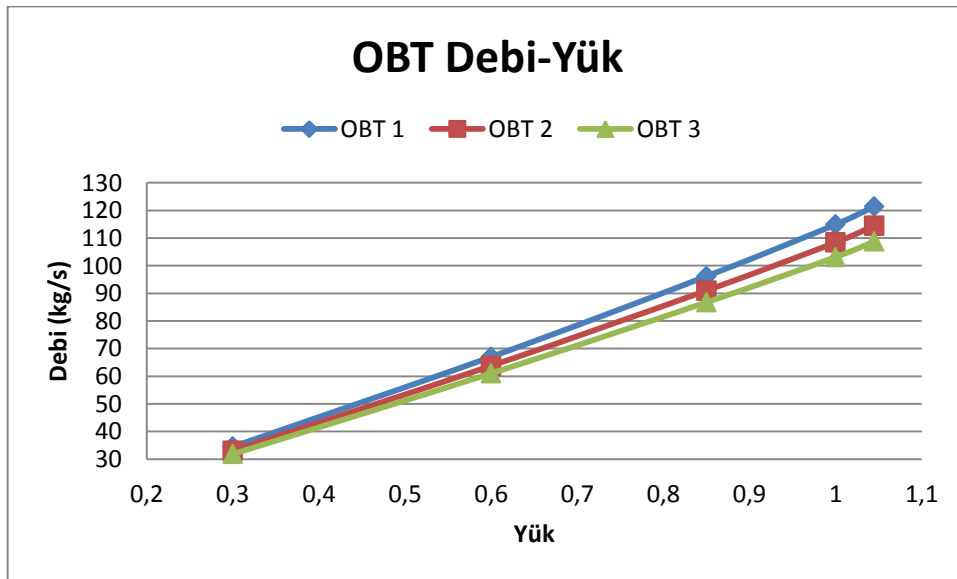
Nozul reglajı ile kontrol edilen bu sistemde kütleli debi (kg/s) değiştirilerek yük miktarı ayarlanmakta ve debi de basınç gibi yük ile orantılı bir şekilde değişmektedir. Her bir türbinde dolaşan debi miktarları ve bunların yüke bağlı değişimleri Çizelge 5.2 ile Şekil 5.6, 5.7 ve 5.8'de görülebilmektedir.

Çizelge 5. 2 Kütlesel debilerin yüke göre değişimi

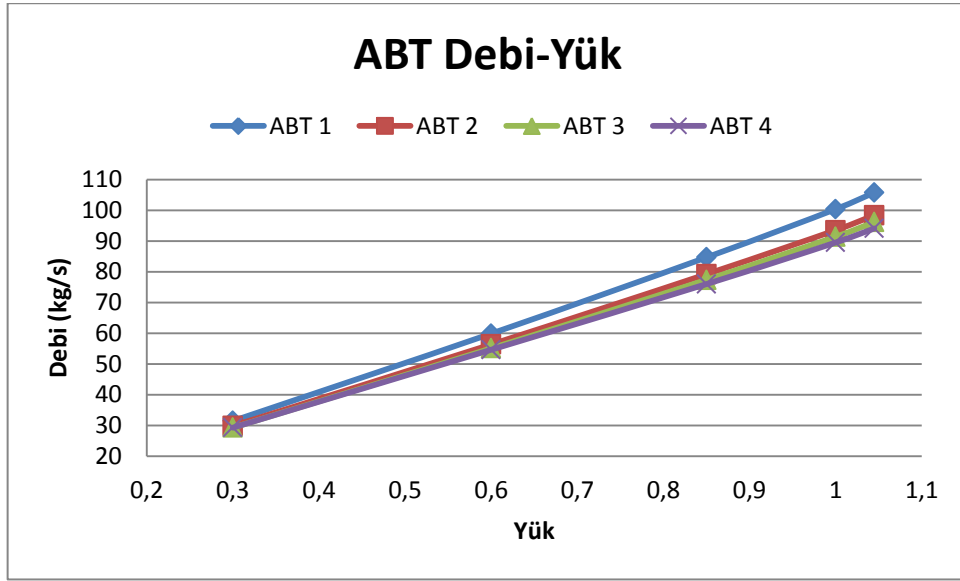
Yük	YBT	OBT ₁	OBT ₂	OBT ₃	ABT ₁	ABT ₂	ABT ₃	ABT ₄
1,047	133,992	121,410	114,427	108,731	105,818	98,442	96,209	94,135
1	126,719	114,901	108,414	103,101	100,417	93,561	91,422	89,551
0,85	106,706	96,154	90,988	86,737	84,701	79,233	77,399	76,013
0,6	74,763	67,002	63,752	61,035	59,874	56,361	55,088	54,630
0,3	39,200	34,469	33,039	31,814	31,431	29,823	29,244	29,244



Şekil 5. 6 Debinin yüke göre değişimi (YBT)



Şekil 5. 7 Debinin yüke göre değişimi (OBT)



Şekil 5. 8 Debinin yüke göre değişimi (ABT)

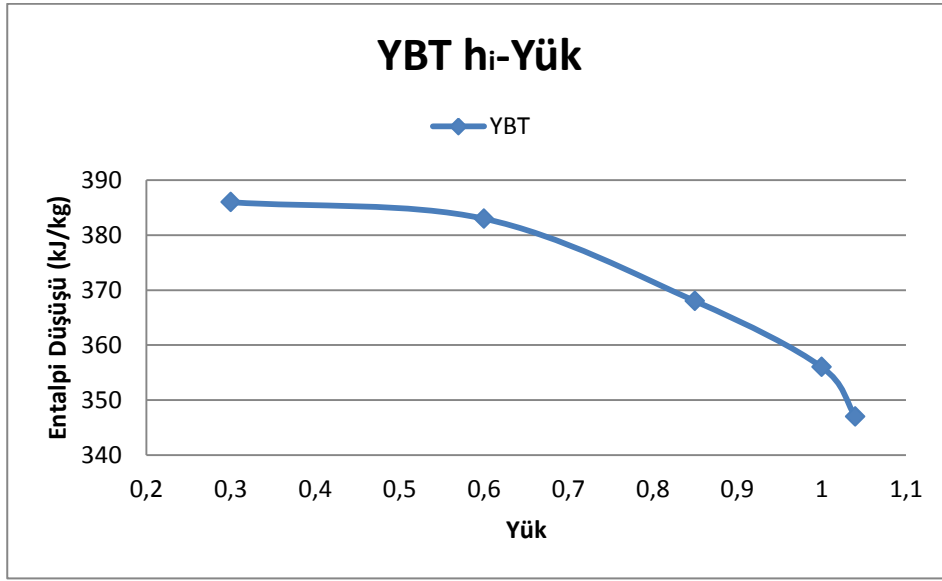
Grafiklerden de görülebildiği üzere debi miktarları yüke bağlı olarak lineer bir şekilde değişim göstermekte ve yük arttıkça artarken yük azaldıkça da azalmaktadır.

5.1.3 Kısmi yüklerde entalpi düşüşü ve güç değişimleri

Türbin giriş ve çıkış basınçlarının yükle orantılı olarak değiştiği farklı yüklerde çalışan türbinlerde giriş ve çıkış noktalarındaki özgül entalpi değerleri de yüke bağlı olarak artacak veya azalacaktır. Ancak, OBT ve ABT türbinlerinde özgül entalpi değerlerinde meydana gelen bu değişim neticesinde türbinlerdeki teorik entalpi düşüşü ve indike iş değerleri, çok düşük yükler hariç, neredeyse aynı kalmaktadır. Yani yük miktarı değişse bile bir türbinden elde edilecek teorik iş miktarı hemen hemen sabit kalmaktadır. Yüksek basınç türbinlerinde ise giriş basıncının ve sıcaklığının sabit çıkış basıncının ise değişken olmasından ötürü yük miktarı azaldıkça türbinden elde edilecek teorik iş miktarı artmaktadır. Farklı yüklerde çalışan türbinlerde meydana gelen indike iş değişimleri Çizelge 5.3 ile Şekil 5.9, 5.11 ve 5.13'te görülebilmektedir.

Çizelge 5.3 Türbinlerdeki entalpi düşüşlerinin yüke göre değişimi

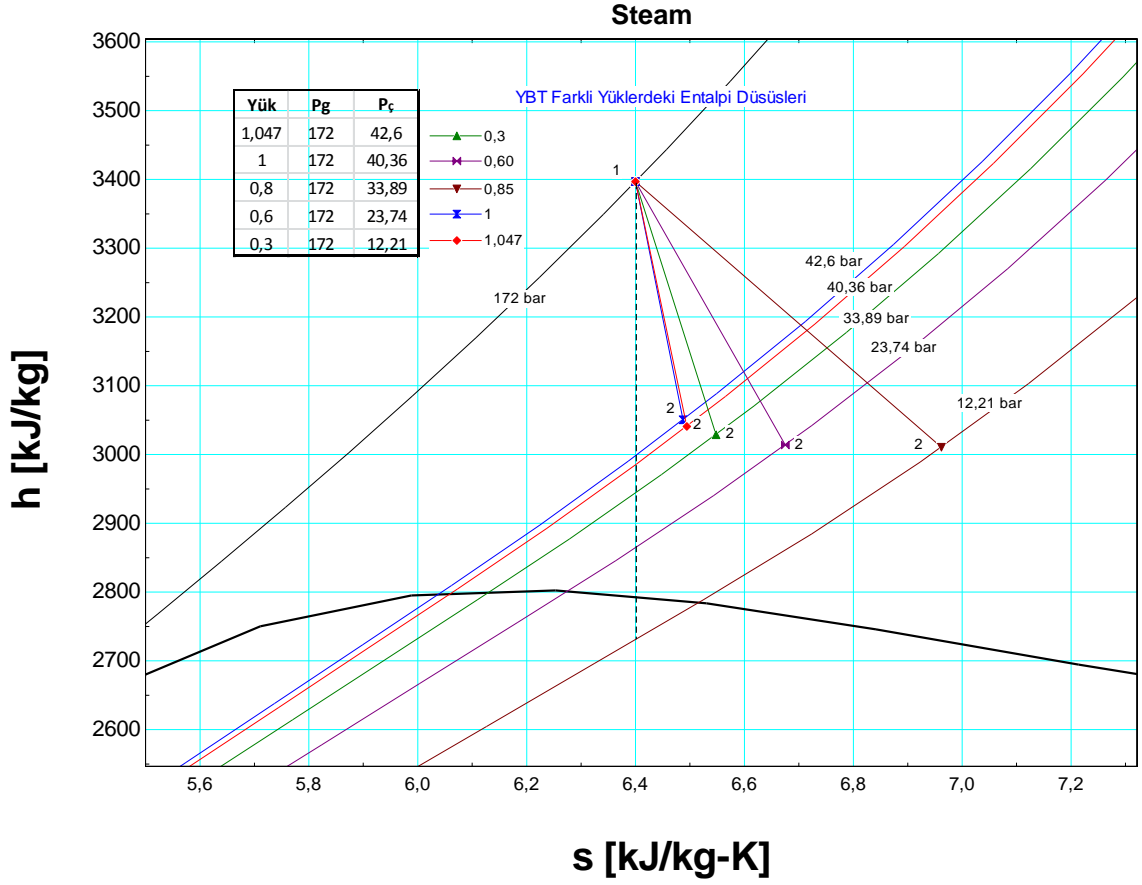
	YBT	OBT			ABT			
Yük	h_i	h_{i1}	h_{i2}	h_{i3}	h_{i1}	h_{i2}	h_{i3}	h_{i4}
1,047	347	174	199	171	188	209	94	131
1	356	175	198	171	189	210	91	132
0,85	368	174	199	171	189	211	93	130
0,6	383	174	199	172	189	214	89	123
0,3	386	170	195	169	188	211	79	93



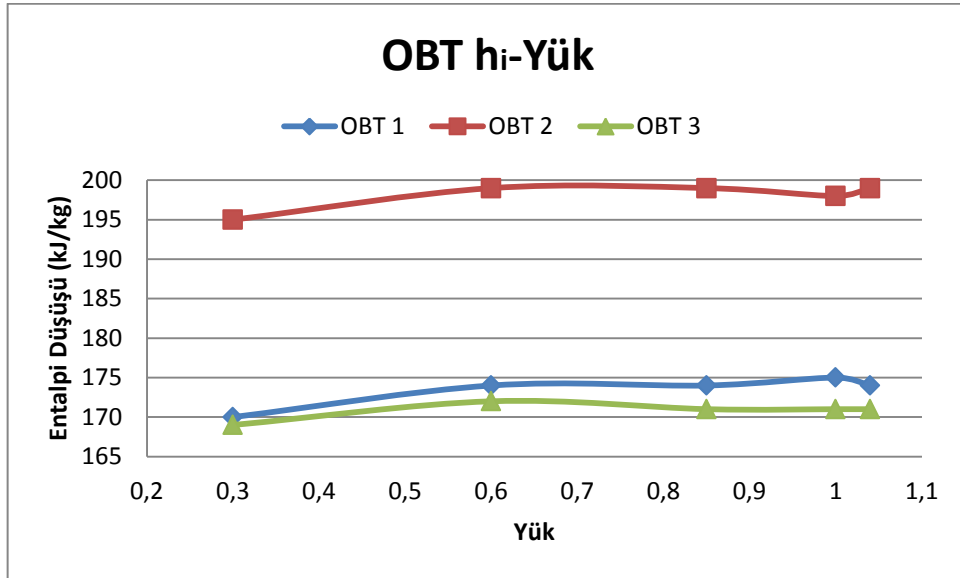
Şekil 5. 9 Entalpi düşüşünün yüke göre değişimi (YBT)

Bunlara ek olarak farklı yüklerde meydana gelen teorik entalpi düşüşleri de her bir türbin için ayrı ayrı h-s diyagramları üzerinde karşılaştırmalı olarak Şekil 5.10, 5.12 ve 5.14'te görülmektedir.

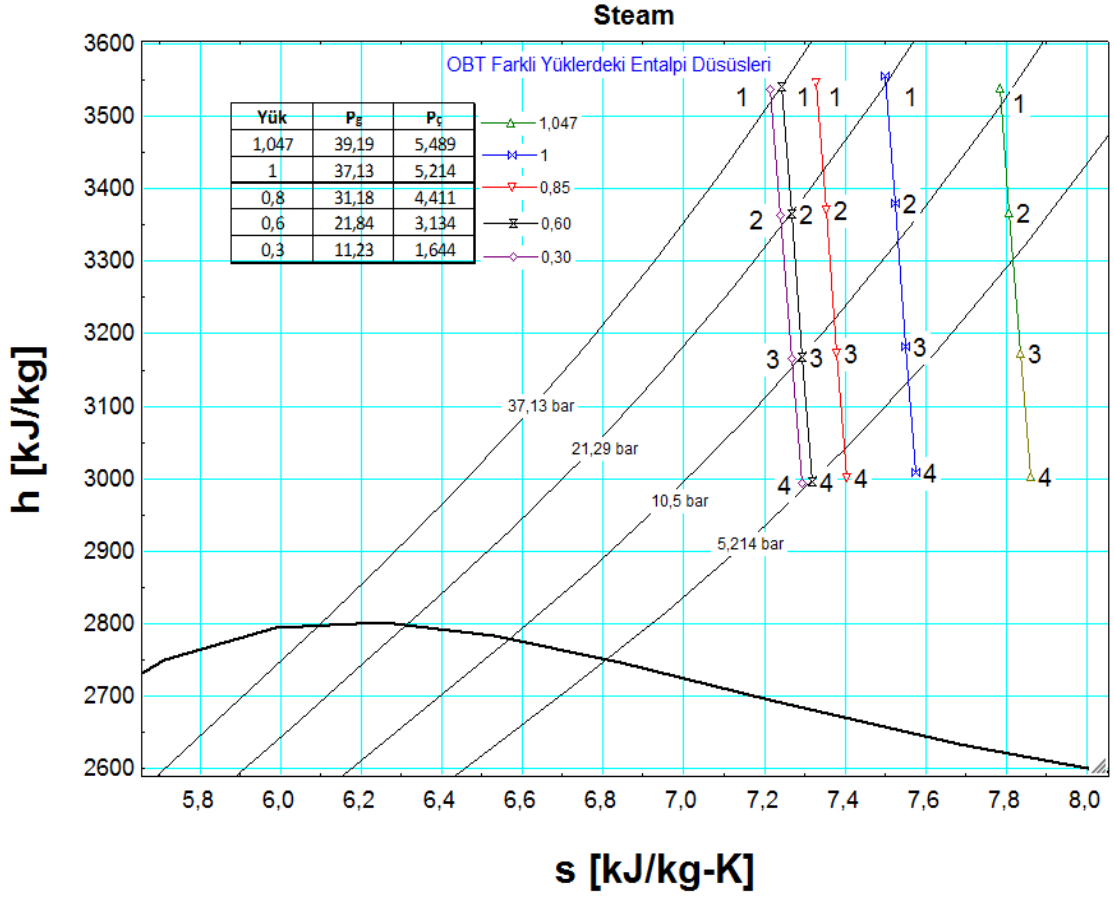
Yüksek basınç türbininde yükün azalmasıyla birlikte teorik entalpi düşüşü artmaya başlarken orta ve alçak basınç türbinlerinde ise bu düşüş neredeyse sabit kalmaktadır.



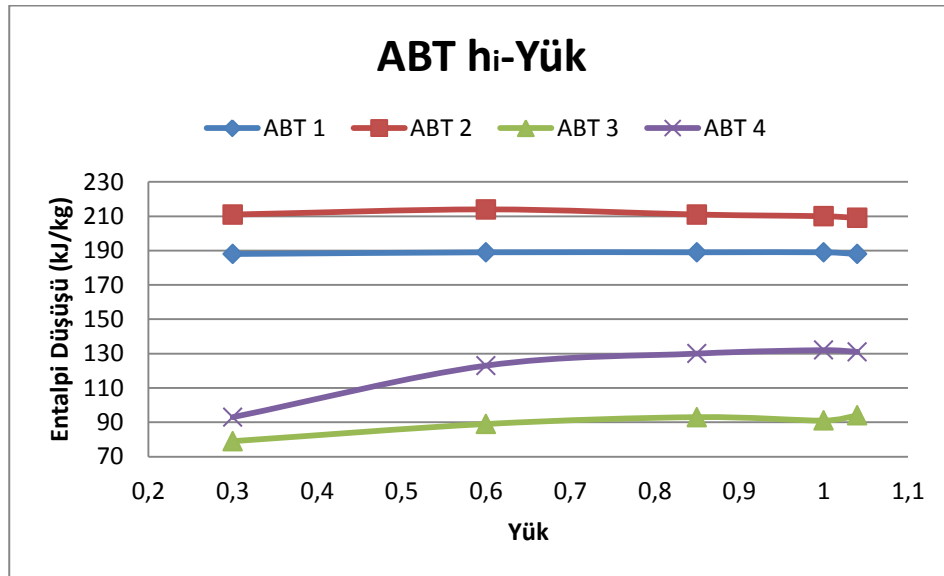
Şekil 5. 10 Entalpi düşüşünün h-s diyagramında gösterilmesi (YBT)



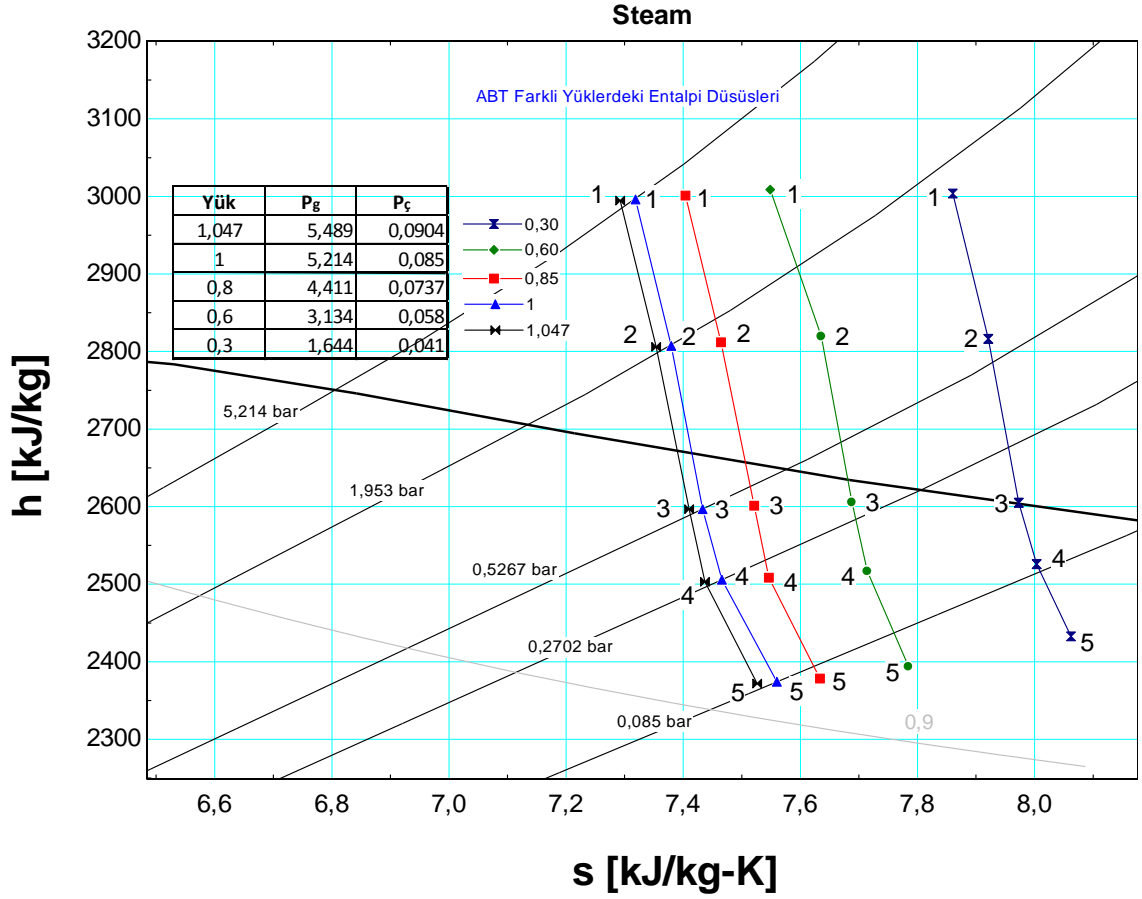
Şekil 5. 11 Entalpi düşüşünün yüke göre değişimi (OBT)



Şekil 5. 12 Entalpi düşüşünün h-s diyagramında gösterilmesi (OBT)



Şekil 5. 13 Entalpi düşüşünün yüke göre değişimi (ABT)



Şekil 5. 14 Entalpi düşüşünün h-s diyagramında gösterilmesi (ABT)

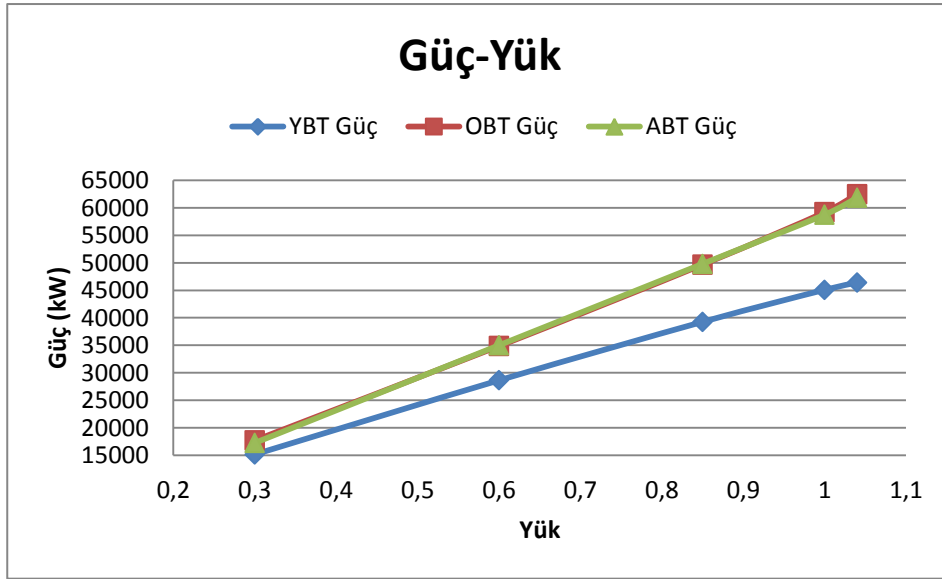
Sistemin yükünün belirlenmesinde esas parametre olan üretilen güç değerleri farklı yüklerde türbinlerde meydana gelen entalpi düşüşlerine ve debi miktarlarına bağlı olarak değişecektir.

Yüksek basınç türbininde indike iş miktarının artmasına rağmen debinin azalmasıyla birlikte üretilen güç de yük miktarı azaldıkça azalmaktadır. Orta ve alçak basınç türbinlerinde ise entalpi düşüşlerinin sabit kalmasına rağmen debi miktarlarının düşmesine paralel olarak üretilen güç miktarları da azalmaktadır.

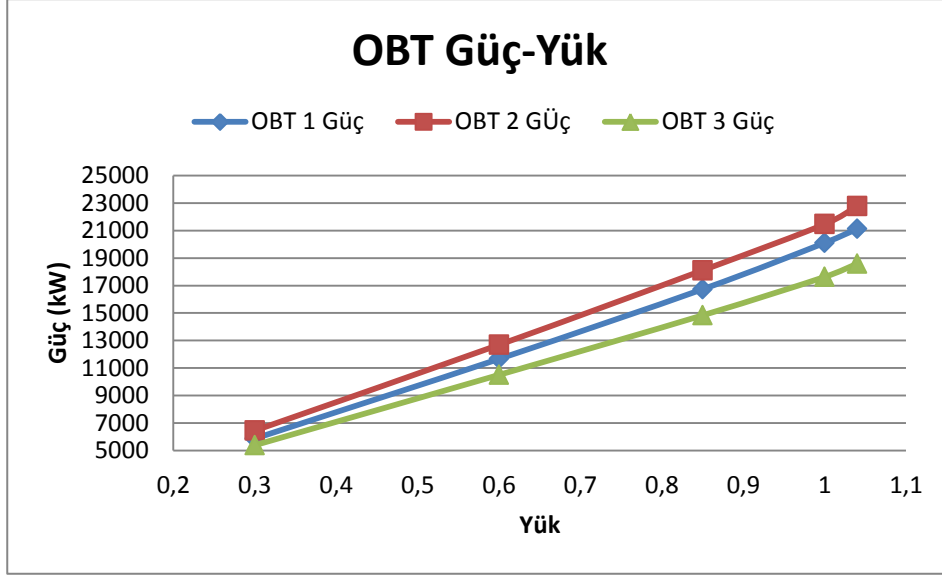
Farklı yüklerde sistemdeki her bir türbinde üretilen güç miktarlarına ait tablo ve grafikler Çizelge 5.4 ile Şekil 5.15-5.17'de görülmektedir.

Çizelge 5. 4 Türbinlerde üretilen güçlerin yüke göre değişimi

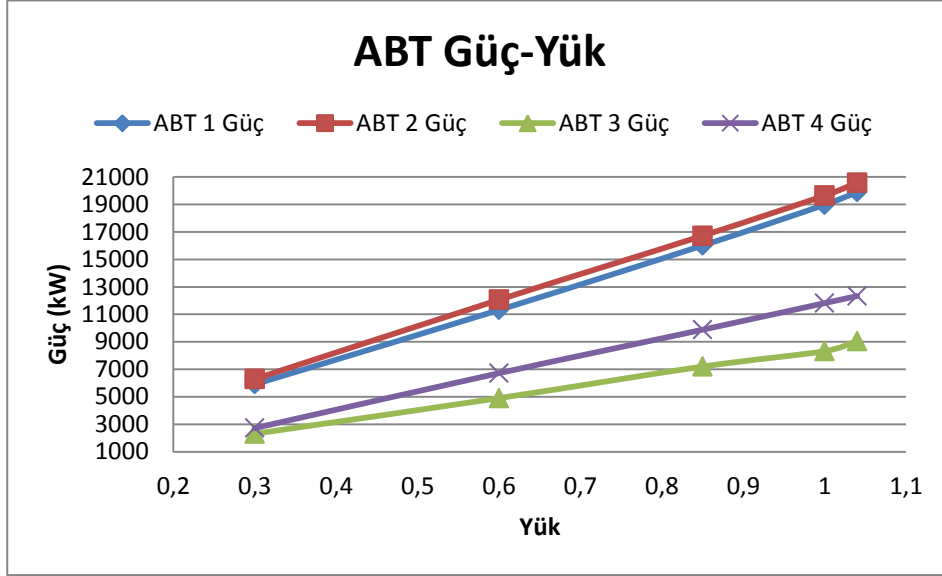
Yük	YBT	OBT ₁	OBT ₂	OBT ₃	Σ OBT
1,047	46409	21125,34	22770,96	18593,1	62489,4
1	45088	20107,69	21465,9	17630,2	59203,8
0,85	39251	16730,83	18106,57	14832	49669,4
0,6	28618	11658,29	12686,64	10498,1	34843
0,3	15134	5859,76	6442,64	5376,55	17678,9
	ABT ₁	ABT ₂	ABT ₃	ABT ₄	ΣABT
1,047	19893,79	20574,31	9043,66	12331,7	61843,5
1	18978,8	19647,83	8319,4	11820,8	58766,8
0,85	16008,46	16718,12	7198,1	9881,7	49806,4
0,6	11316,17	12061,16	4902,86	6719,52	34999,7
0,3	5909,1	6292,61	2310,29	2719,71	17231,7



Şekil 5. 15 Gücün yüke göre değişimi



Şekil 5. 16 Gücün yüke göre değişimi (OBT)



Şekil 5. 17 Gücün yüke göre değişimi (ABT)

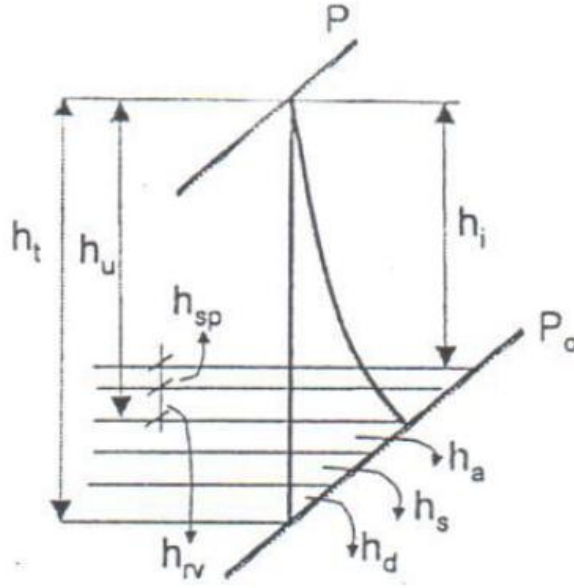
5.1.4 Kısmi yüklerde türbin kayıpları ve indike verimleri

Türbinlerde önemli bir performans parametresi olan iç/indike verim değerleri ya firmalar tarafından garanti edilen türbin giriş ve çıkışlarındaki gerçek entalpi değerleri ile ya da her bir basamakta gerçekleşen teorik entalpi düşüşünden yine o basamakta meydana gelen kayıpların çıkarılmasıyla elde edilebilir (Şekil 5. 18).

Türbin basamaklarında kayıp hesabı yapabilmek için her bir basamaktaki basınç ve sıcaklık değerlerinin bilinmesi gerekmektedir. Farklı yüklerde giriş ve çıkış şartlarındaki

basınç ve sıcaklık değerleri bilinen bir türbinin basamaklarındaki basınç ve sıcaklık değerlerinin lineer bir şekilde azaldığı varsayılarak hesaplamalar yapılmıştır.

Kayıplar yardımıyla indike verimleri belirlenirken yüksek basınç türbini için 13, orta basınç türbini için 10 ve alçak basınç türbini için 5 basamak için sabit kanat (h_d), hareketli kanat (h_s), çıkış (h_a), tekerlek sürtme ve rüzgarlama (h_{rv}) ve aralık kaçak (h_{sp}) kayıpları hesaplanmıştır. Hesaplamalar yapılırken sabit ve hareketli kanat kayıp katsayıları ve buhar giriş ve çıkış açıları ile ilgili bazı kabuller yapılmıştır.

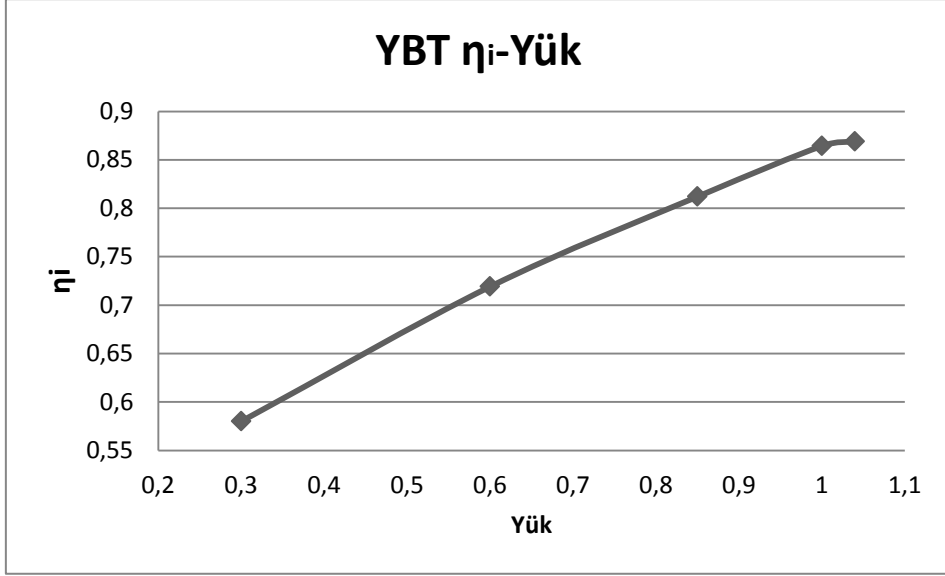


Şekil 5. 18 Türbin basamak kayıpları

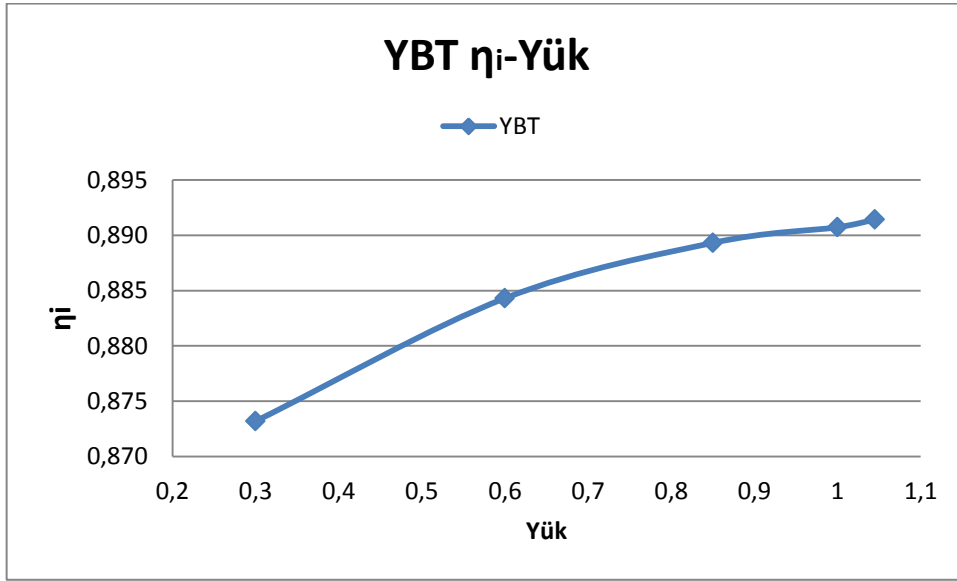
Yüksek basınç türbini için firma tarafından garanti edilen değerlerle hesaplanan indike verim değerleri ile türbin kayıpları hesaplanarak elde edilen indike verim değerleri karşılaştırılarak elde edilen sonuçlar Çizelge 5.5 ve Şekil 5.19 a ve b'de gösterilmiştir.

Çizelge 5. 5 Türbin iç veriminin yüke bağlı değişimi (YBT)

Yük (%)	η_i (Firma)	η_i (Kayıp Hesabı)
1,047	0,869	0,891
1	0,8643	0,890
0,85	0,812	0,886
0,6	0,7191	0,874
0,3	0,58	0,825



Şekil 5. 19 a) Türbin iç veriminin yüke bağlı değişimi-Firma (YBT)



Şekil 5. 19 b) Türbin iç veriminin yüke bağlı değişimi-Kayıp hesabı (YBT)

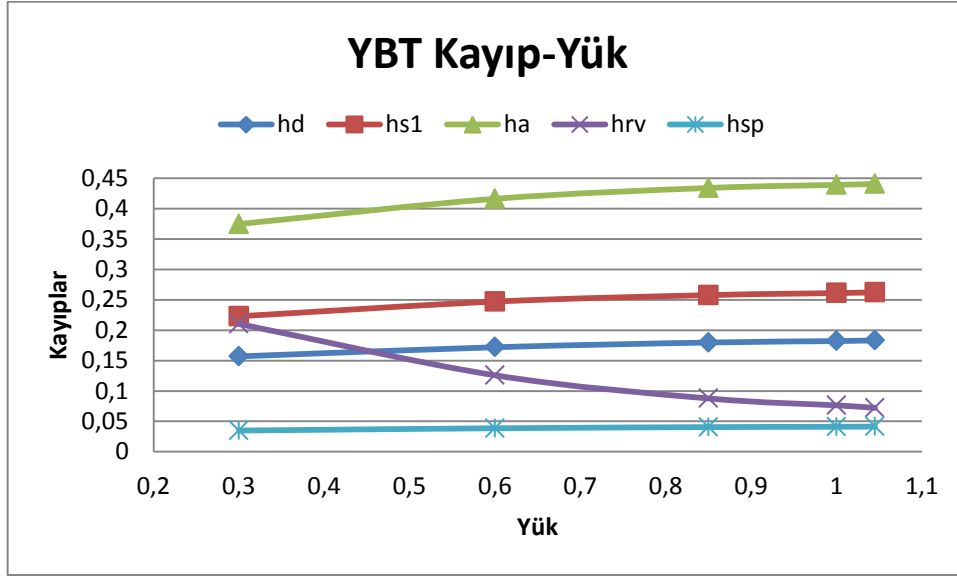
Elde edilen her iki grafikte de türbin indike verim değerlerinin azalan yükle birlikte azaldığı ancak, verim değerlerinin bir miktar farklı olduğu görülebilmektedir.

YBT için hesaplanan kayıp değerleri toplam kaybın yüzdesi şeklinde Çizelge 5. 6'da ve bu değerler yardımıyla elde edilen grafik de Şekil 5.20'de görülmektedir.

Çizelge 5. 6 Türbinlerdeki kayıpların yüke bağlı değişimi (YBT)

Yük	h_d	h_{s1}	h_a	h_{rv}	h_{sp}
1,047	0,182	0,255	0,421	0,101	0,041
1	0,180	0,252	0,415	0,113	0,041
0,85	0,174	0,243	0,400	0,144	0,039
0,6	0,158	0,220	0,361	0,226	0,035
0,3	0,114	0,157	0,256	0,449	0,024

Yapılan hesaplamalardan YBT için, düşük yükler hariç, azalan yükle birlikte türbin kayıp yüzdelerinin çok fazla değişmediği ve sabit kanat, hareketli kanat, çıkış ve aralık kaçak kayıplarının azalırken tekerlek sürtme ve rüzgarlama kaybının arttığı görülmektedir.



Şekil 5. 20 Türbin kayıplarının yüke bağlı değişimi (YBT)

OBT için yapılan indike verim ve kayıp hesaplamaları çekilen ara buhar sayısına göre üç farklı kısımda (4+4+2 basamak) gerçekleştirilmiştir. Firma tarafından garanti edilen değerlere göre hesaplanan iç verim değerleri %90-93 arasında olmasına karşılık kayıp hesapları neticesinde elde edilen değerlerse %84-90 arasında değişmektedir.

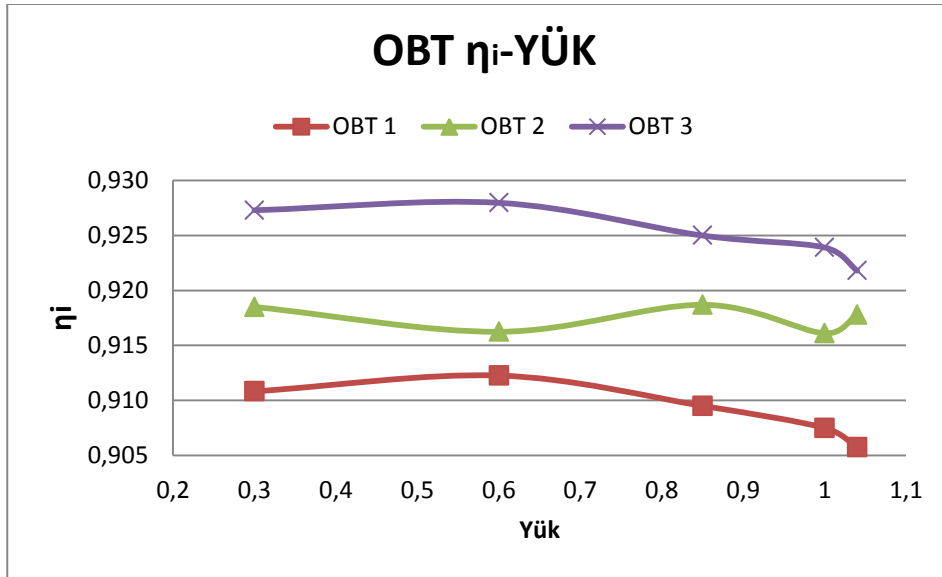
Kayıp hesapları ile belirlenen indike verimlerde meydana gelen değişimlerin 60% yüke kadar çok fazla değişmediği ancak daha düşük yüklerde azalma oranının arttığı görülmektedir. Firma değerlerine göre yapılan hesaplamalarda ise yük değişimine bağlı

olarak indike verimlerin kararlı bir değişim gösterdiğini söylemek zor olmakla birlikte verim değerlerindeki değişimin çok fazla olmadığı görülmektedir.

Yük değişimine bağlı olarak hesaplanan indike verim değerleri Çizelge 5.7 a ve b ile Şekil 5. 21 a ve b'de görülebilmektedir.

Çizelge 5. 7 a) Türbin iç veriminin yüke bağlı değişimi-Firma (OBT)

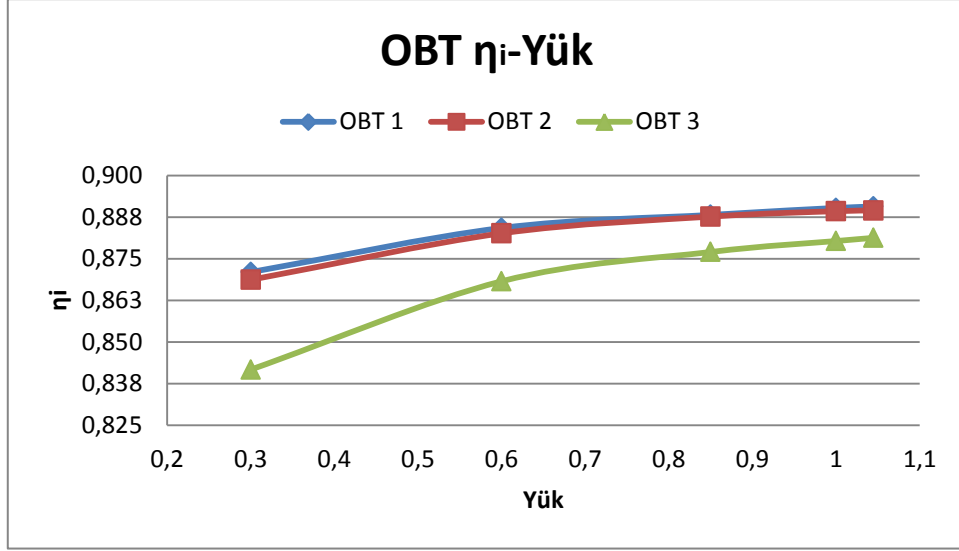
Yük	$\eta_{i \text{ OBT } 1}$	$\eta_{i \text{ OBT } 2}$	$\eta_{i \text{ OBT } 3}$
1,047	0,906	0,922	0,927
1	0,908	0,921	0,929
0,85	0,909	0,92	0,929
0,6	0,913	0,920	0,931
0,3	0,910	0,919	0,929



Şekil 5. 21 a) Türbin iç veriminin yüke bağlı değişimi (OBT)

Çizelge 5. 7 b) Türbin iç veriminin yüke bağlı değişimi-Kayıp hesabı (OBT)

Yük	$\eta_{i \text{ OBT } 1}$	$\eta_{i \text{ OBT } 2}$	$\eta_{i \text{ OBT } 3}$
1,047	0,8901	0,8900	0,8796
1	0,8901	0,8896	0,8793
0,85	0,8885	0,8875	0,8758
0,6	0,8857	0,8822	0,8675
0,3	0,8474	0,8697	0,8421

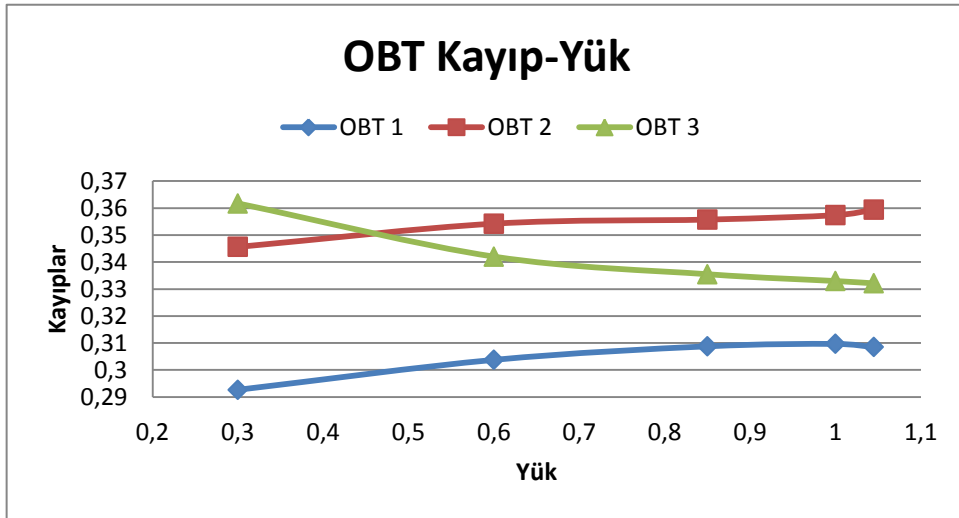


Şekil 5. 21 b) Türlin iç veriminin yüke bağlı değişimi-Kayıp hesabı (OBT)

Orta basınç türbininde basınç düştükçe türbindeki kayıplar arttığı ve bu kayıpların da küçükten büyüğe doğru sırasıyla OBT₁, OBT₃ ve OBT₂'de gerçekleştiği orta basınç türbinin her üç kısmı için yapılan kayıp hesaplamalarında görülmektedir (Çizelge 5.8 ve Şekil 5.22).

Çizelge 5. 8 Türlin kayıplarının yüke bağlı değişimi (OBT)

Yük	OBT ₁	OBT ₂	OBT ₃
1,047	0,3085	0,3594	0,3321
1	0,3097	0,3574	0,3330
0,85	0,3088	0,3557	0,3355
0,6	0,3038	0,3542	0,3420
0,3	0,2927	0,3456	0,3617

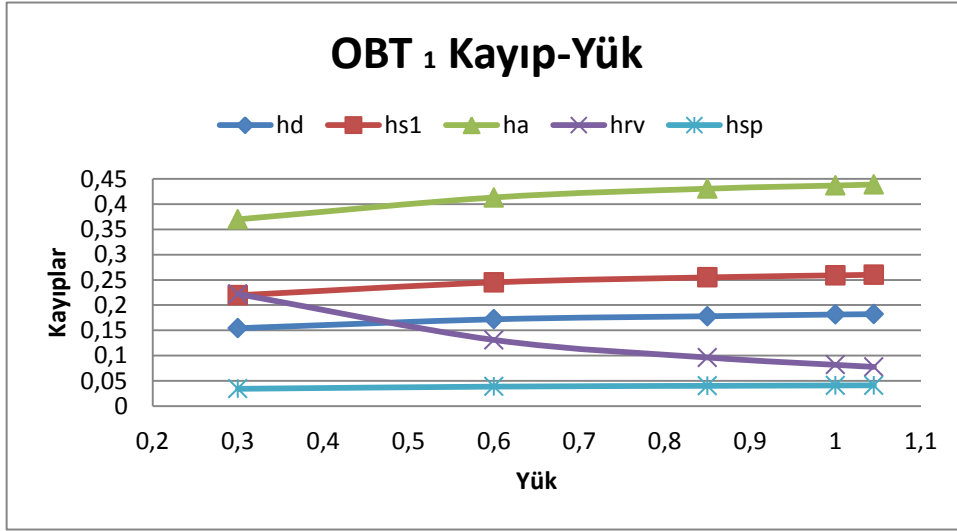


Şekil 5. 22 Türlin kayıplarının yüke bağlı değişimi (OBT)

Orta basınç türbinin her bir kısmında yük miktarı azaldıkça tekerlek sürtme ve rüzgarlama kayıpları hariç diğer kayıpların azaldığı görülmektedir. Orta basınç türbinin üç farklı kısmında meydana gelen kayıplar Çizelge 5.9 a, b ve c ile Şekil 5.23 a, b ve c’de verilmiştir.

Çizelge 5. 9 a) Türbin kayıplarının yüke göre değişimi (OBT₁)

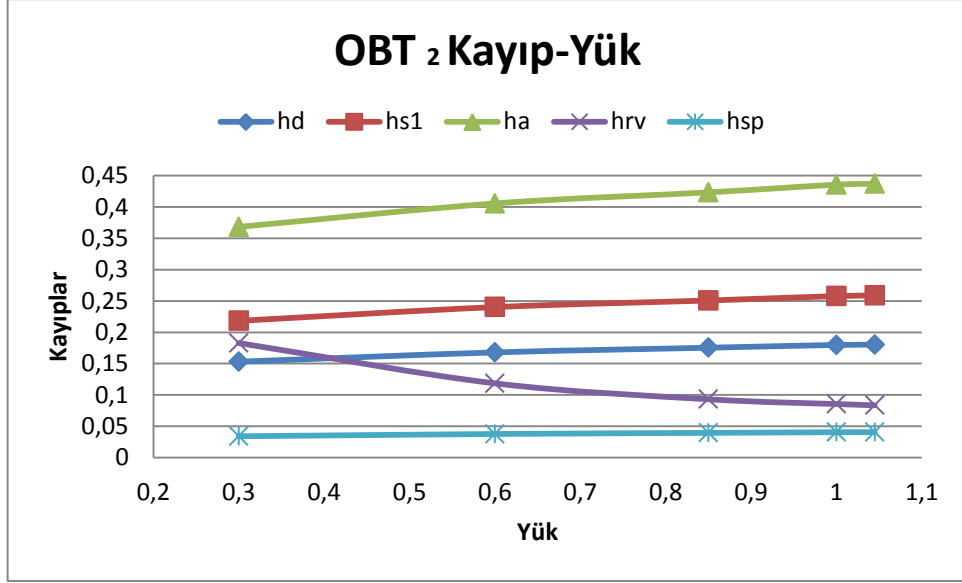
Yük	h_d	h_{s1}	h_a	h_{rv}	h_{sp}
1,047	0,181	0,261	0,442	0,075	0,041
1	0,181	0,260	0,440	0,078	0,041
0,85	0,178	0,256	0,433	0,092	0,040
0,6	0,174	0,243	0,408	0,136	0,039
0,3	0,130	0,196	0,335	0,310	0,029



Şekil 5. 23 a) Türbin kayıplarının yüke bağlı değişimi (OBT₁)

Çizelge 5. 9 b) Türbin kayıplarının yüke göre değişimi (OBT₂)

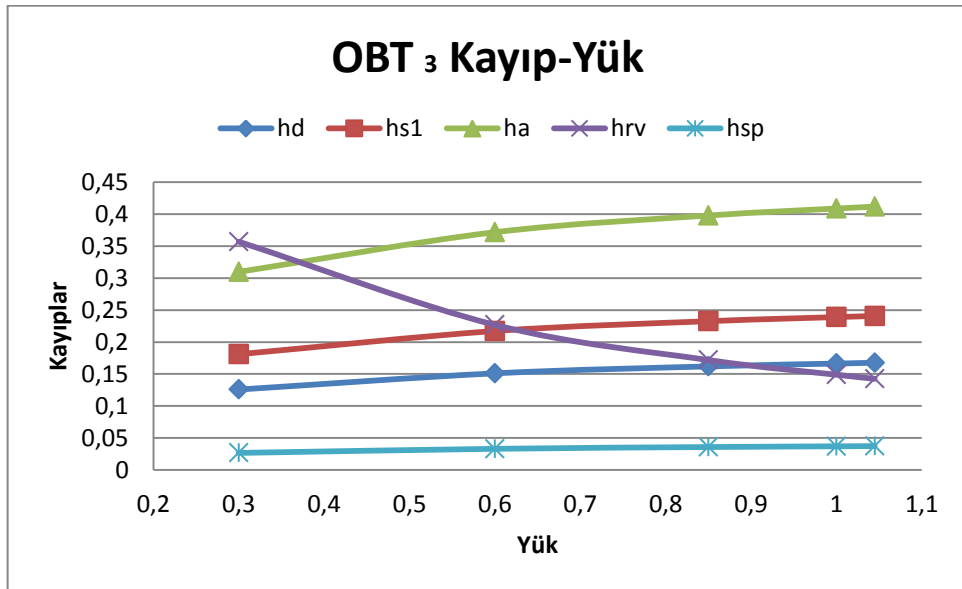
Yük	h_d	h_{s1}	h_a	h_{rv}	h_{sp}
1,047	0,181	0,260	0,440	0,079	0,041
1	0,182	0,262	0,444	0,082	0,041
0,85	0,174	0,250	0,423	0,086	0,039
0,6	0,160	0,230	0,388	0,102	0,036
0,3	0,161	0,232	0,394	0,177	0,036



Şekil 5. 23 b) Türbin kayıplarının yüke bağlı değişimi (OBT₂)

Çizelge 5. 9 c) Türbin kayıplarının yüke göre değişimi (OBT₃)

Yük	h _d	h _{s1}	h _a	h _{rv}	h _{sp}
1,047	0,165	0,243	0,420	0,134	0,037
1	0,165	0,241	0,416	0,141	0,037
0,85	0,160	0,236	0,406	0,162	0,036
0,6	0,150	0,221	0,381	0,216	0,033
0,3	0,126	0,185	0,320	0,341	0,027



Şekil 5. 23 c) Türbin kayıplarının yüke bağlı değişimi (OBT₃)

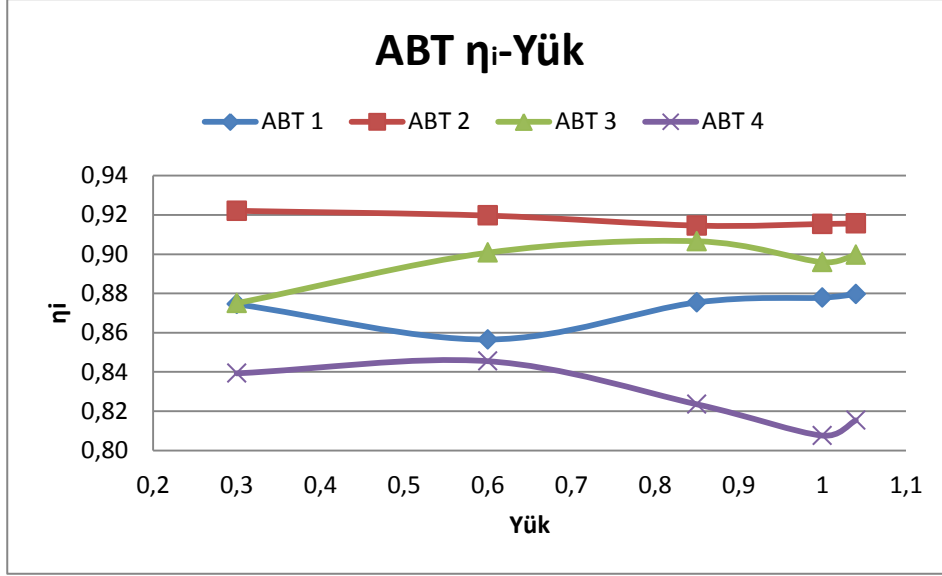
ABT için yapılan indike verim ve kayıp hesaplamaları çekilen ara buhar sayısına göre dört farklı kısımda (2+1+1+1 basamak) gerçekleştirilmiştir. Firma tarafından garanti edilen değerlere göre hesaplanan iç verim değerleri %87-92 arasında olmasına karşılık kayıp hesapları neticesinde elde edilen değerlerse %65-88 gibi çok geniş bir aralıkta değişmektedir.

Kayıp hesapları ile belirlenen indike verimler ABT_1 ve ABT_3 için yüksek olmasına karşılık ABT_2 ve ABT_4 için daha düşük olmakta ve düşük yüklerde verimin azalma miktarı daha fazla olmaktadır. Firma değerlerine göre yapılan hesaplamalarda ise yük değişimine bağlı olarak ABT_2 ve ABT_3 indike verimleri yüksek olmasına karşılık ABT_1 ve ABT_4 daha düşük değerlerdedir. Ancak, alçak basınç türbini de OBT gibi yük değişimine bağlı kararlı bir değişim gösterememekle birlikte verim değerlerindeki değişimin çok fazla olmadığı da görülmektedir.

Yük değişimine bağlı olarak hesaplanan indike verim değerleri Çizelge 5.10 a ve b ile Şekil 5. 24 a ve b'de görülebilmektedir.

Çizelge 5. 10 a) Türbin iç verimlerinin yüke bağlı değişimi-Firma (ABT)

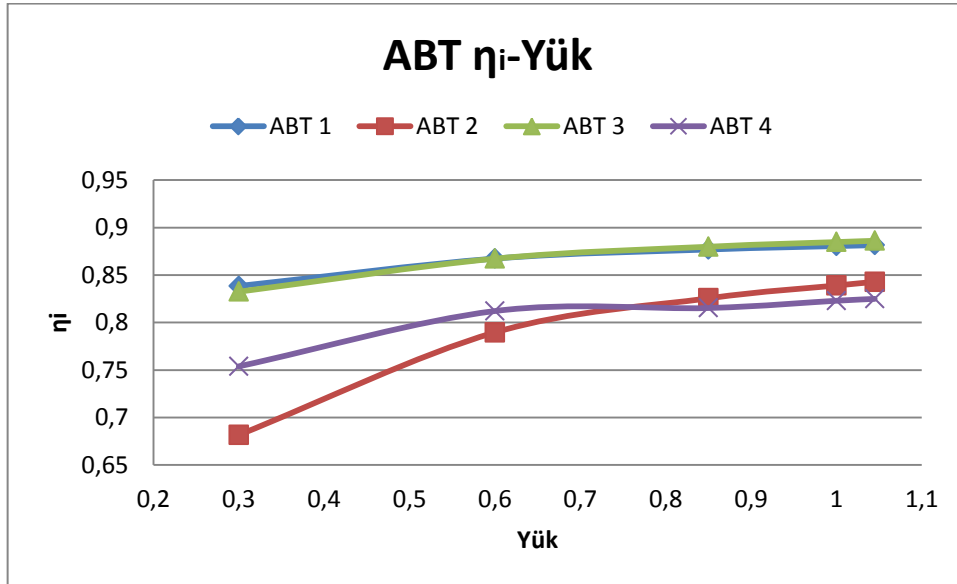
Yük	$\eta_{ABT 1}$	$\eta_{ABT 2}$	$\eta_{ABT 3}$	$\eta_{ABT 4}$
1,047	0,8761	0,9119	0,9115	0,8224
1	0,8762	0,9168	0,8912	0,8159
0,85	0,8772	0,9134	0,9166	0,8266
0,6	0,833	0,9223	0,9119	0,8465
0,3	0,8758	0,9243	0,8914	0,8399



Şekil 5. 24 a) Türbin iç veriminin yüke bağlı değişimi-Firma (ABT)

Çizelge 5. 10 b) Türbin iç verimlerinin yüke bağlı değişimi-Kayıp hesabı (ABT)

Yük	η_i ABT1	η_i ABT2	η_i ABT3	η_i ABT4
1,047	0,8798	0,8330	0,8814	0,80961
1	0,8788	0,8286	0,8798	0,80664
0,85	0,8754	0,8131	0,8742	0,79675
0,6	0,8662	0,7725	0,8593	0,79337
0,3	0,7840	0,6499	0,8171	0,71434

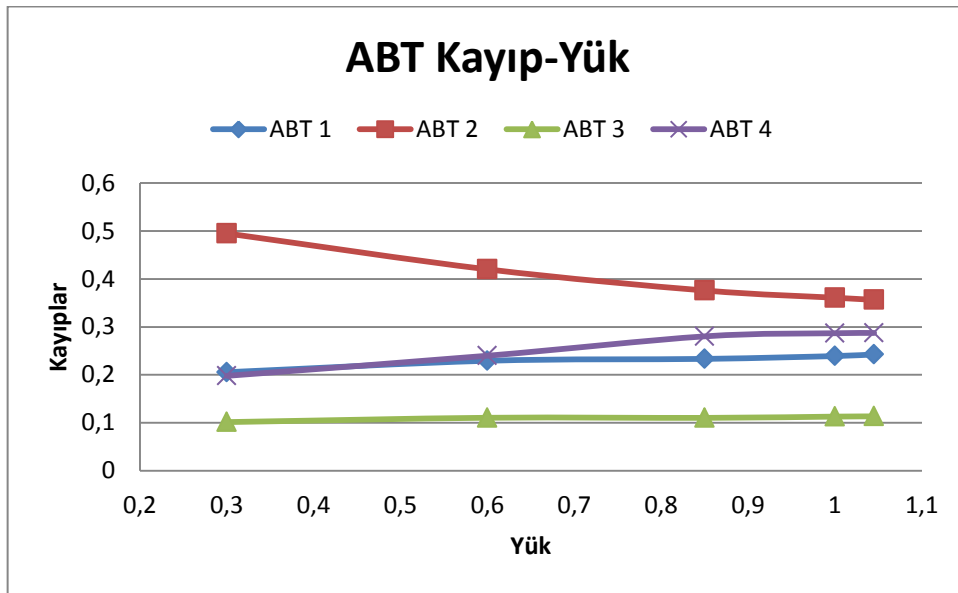


Şekil 5. 24 b) Türbin iç veriminin yüke bağlı değişimi- Kayıp hesabı (ABT)

Alçak basınç türbininde yüke bağlı olarak değişen kayıpların ABT₃, ABT₁, ve ABT₄'de azaldığı görülürken ABT₂'de arttığı ve bu oranların düşük yüklerde daha fazla olduğu ve en fazla kaybın ABT₂'de ortaya çıktığı alçak basınç türbini için yapılan kayıp hesaplamalarında görülmektedir (Çizelge 5.11 ve Şekil 5.25).

Çizelge 5. 11 Türbin kayıplarının yüke bağlı değişimi (ABT)

Yük	ABT ₁	ABT ₂	ABT ₃	ABT ₄
1,047	0,2426	0,3565	0,1135	0,2874
1	0,2392	0,3609	0,1130	0,2869
0,85	0,2333	0,3760	0,1103	0,2803
0,6	0,2294	0,4201	0,1105	0,2399
0,3	0,2055	0,4950	0,1015	0,1980

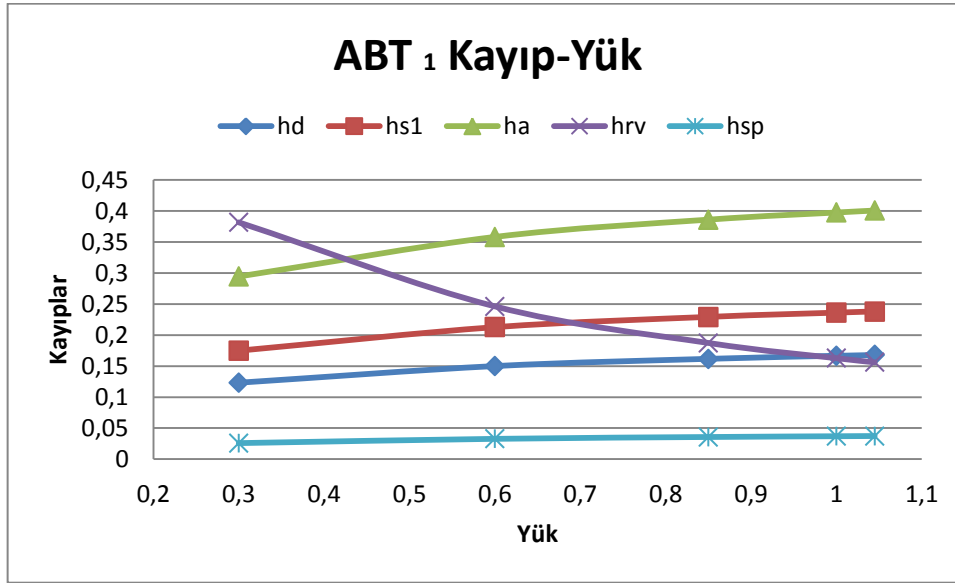


Şekil 5. 25 Türbin kayıplarının yüke bağlı değişimi (ABT)

Alçak basınç türbinin her bir kısmında yük miktarı azaldıkça tekerlek sürtme ve rüzgarlama kayıpları hariç diğer kayıpların azaldığı görülmektedir. Alçak basınç türbinin üç farklı kısmında meydana gelen kayıplar Çizelge 5.12 a, b, c ve d ile Şekil 5.26 a, b, c ve d'de verilmiştir.

Çizelge 5. 12 a) Türbin kayıplarının yüke bağlı değişimi (ABT₁)

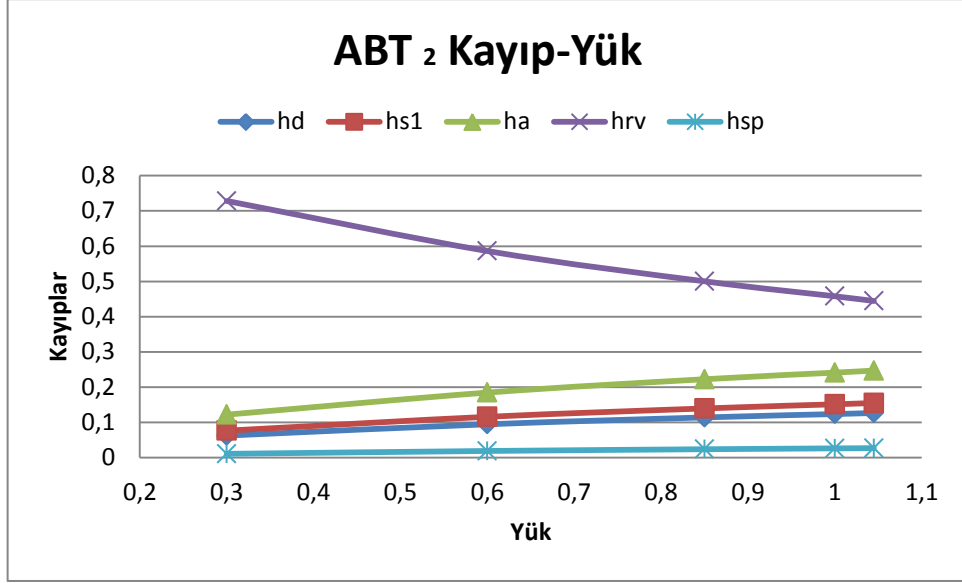
Yük	h_d	h_{s1}	h_a	h_{rv}	h_{sp}
1,047	0,166	0,241	0,409	0,147	0,037
1	0,164	0,239	0,406	0,154	0,037
0,85	0,160	0,233	0,395	0,177	0,035
0,6	0,149	0,217	0,368	0,234	0,033
0,3	0,092	0,144	0,249	0,495	0,020



Şekil 5. 26 a) Türbin kayıplarının yüke bağlı değişimi (ABT₁)

Çizelge 5. 12 b) Türbin kayıplarının yüke bağlı değişimi (ABT₂)

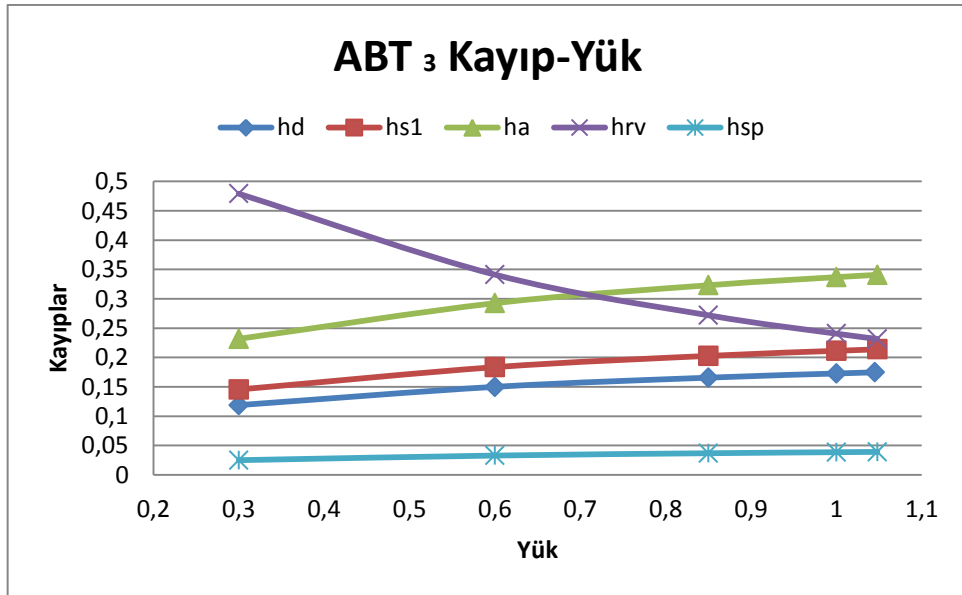
Yük	h_d	h_{s1}	h_a	h_{rv}	h_{sp}
1,047	0,119	0,146	0,232	0,478	0,025
1	0,116	0,142	0,226	0,491	0,024
0,85	0,106	0,130	0,208	0,534	0,022
0,6	0,087	0,107	0,171	0,618	0,017
0,3	0,057	0,070	0,111	0,753	0,009



Şekil 5. 26 b) Türbin kayıplarının yüke bağlı değişimi (ABT₂)

Çizelge 5. 12 c) Türbin kayıplarının yüke bağlı değişimi (ABT₃)

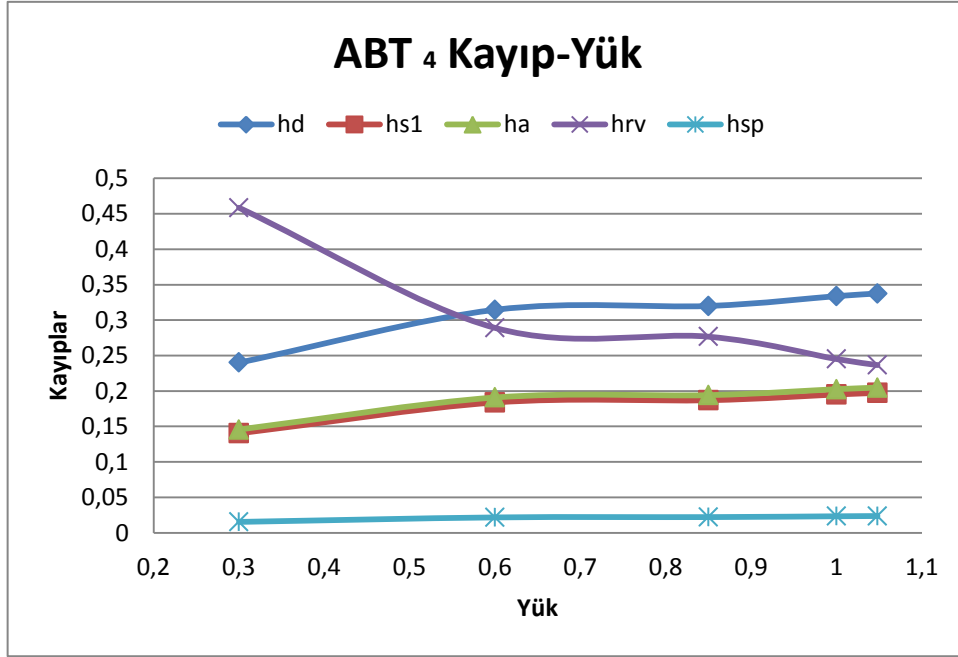
Yük	h _d	h _{s1}	h _a	h _{rv}	h _{sp}
1,047	0,168	0,205	0,327	0,262	0,037
1	0,166	0,203	0,323	0,272	0,037
0,85	0,158	0,194	0,309	0,305	0,035
0,6	0,141	0,173	0,276	0,379	0,031
0,3	0,109	0,133	0,212	0,523	0,022



Şekil 5. 26 c) Türbin kayıplarının yüke bağlı değişimi (ABT₃)

Çizelge 5. 12 d) Türbin kayıplarının yüke bağlı değişimi (ABT₄)

Yük	h_d	h_{s1}	h_a	h_{rv}	h_{sp}
1,047	0,310	0,181	0,188	0,298	0,021
1	0,306	0,179	0,185	0,309	0,021
0,85	0,291	0,170	0,176	0,343	0,020
0,6	0,286	0,167	0,174	0,354	0,019
0,3	0,207	0,121	0,126	0,534	0,013



Şekil 5. 26 d) Türbin kayıplarının yüke bağlı değişimi (ABT₄)

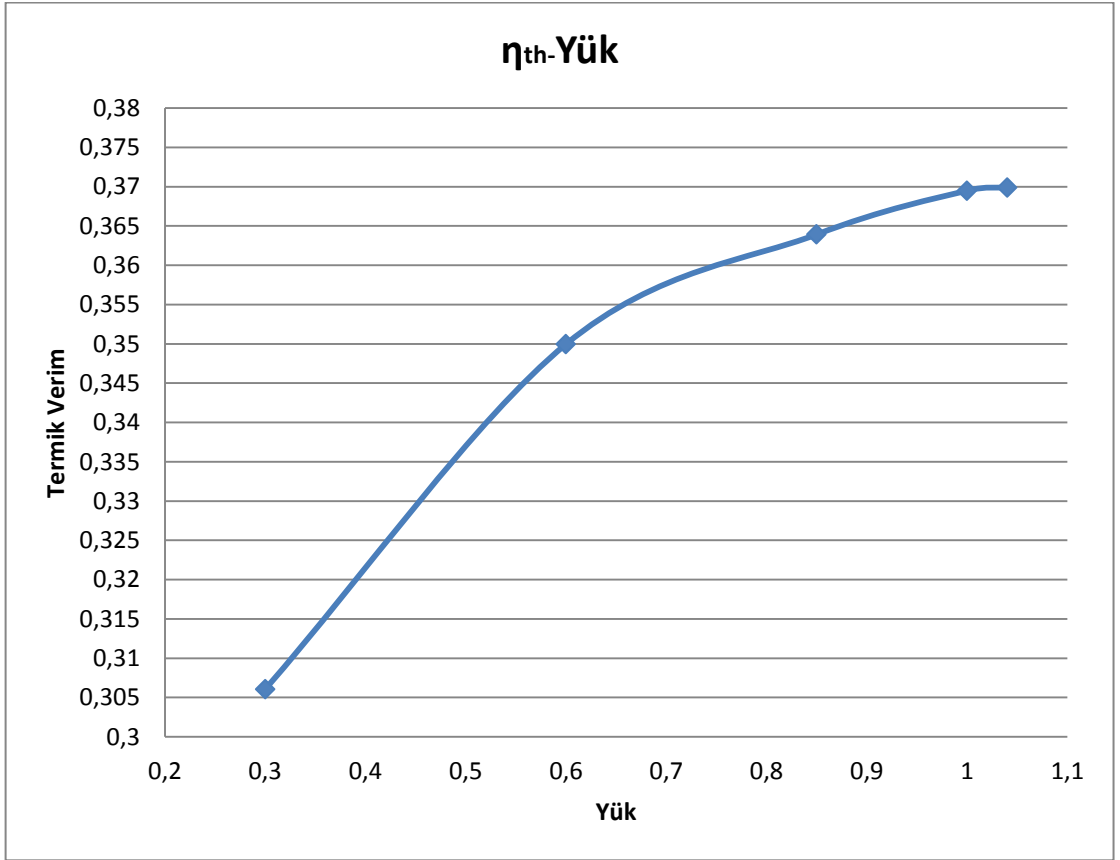
5.1.5 Kısmi yüklerde sistemin termik verimi

Bir sistemin termik verimi sadece bir elemanın değil o sistemi oluşturan bütün elemanların performansına bağlı bir parametredir. İncelenen termik santralse buhar kazanı, buhar türbinleri, kondenser, pompalar ve ısı değiştiricilerden oluşmaktadır ve her bir elemanın sistemin termik verimine olumlu veya olumsuz katkısı vardır.

Çizelge 5.13 ve Şekil 5.27’de görüldüğü gibi yük miktarı azaldıkça sistemin termik verimi de azalmakta yani ekonomikliğı gittikçe kötüleşmektedir. Düşen termik verimle birlikte birim elektrik maliyetleri artacak ve bununla birlikte sistemdeki birçok eleman dizayn dışı şartlarda çalıştığı için zarar görmeye başlayacaktır.

Çizelge 5. 13 Tesisin termik veriminin yüke bağlı değişimi

Yük	Ne (kW)	W _{pompa} (kW)	Net Güç (kW)	Qv (kW)	η_{th}
1,047	167650	8227,333	159422,7	430981,06	0,3699
1	160000	7954,7	152045,3	411491,73	0,3695
0,85	136000	7132,946	128867,1	354100	0,3639
0,6	96000	5865,258	90134,74	257548,81	0,35
0,3	48000	4927,187	43072,81	140730,23	0,3061



Şekil 5. 27 Tesisin termik veriminin yüke bağlı değişimi

BÖLÜM 6

SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmanın giriş kısmında kısmi yüklerde ve dizayn dışı koşullarda türbin davranışları ile ilgili bir literatür taraması yapılarak bunlarla ilgili temel veriler paylaşılmıştır. Daha sonra gelen bölümde ise enerji tesisleri hakkında genel bilgiler verilmektedir.

Buhar türbinlerinin yapısını, çalışma prensiplerini, dizayn ve dizayn dışı koşullarını tezin üçüncü kısmında inceleyerek dördüncü kısımda ise kısmi yük şartlarında türbinlerin çalışma prensipleri, yük ayarlama yöntemleri ve mekanizmaları ve matematiksel modelleri hakkında bilgiler verilmiştir.

Beşinci bölümde ise seçtiğimiz bir tesis üzerinden kısmi yüklerde türbinlerin ve tesisin performansını göstermek üzere bir takım analizler yapılmıştır. Yapılan analizler neticesinde tesisin yük değişimiyle birlikte hem türbinlerin hem de tesisin performansının olumsuz yönde değiştiği gözlemlenmiştir.

Literatürde yer alan modellerin genelde basınç kontrollü sistemler için tasarlanmış olması yani sistemin yükünün türbin girişindeki basıncı değiştirerek yapıyor olması nedeniyle incelenen tesisin performans değerleri için doğru sonuçlar veremeyeceği görülmüştür. Bu eksikliğı kapatabilmek adına tüm kontrol yöntemlerini ve türbin tiplerini kapsayan bir performans ölçüm sisteminin ve standartlarının geliştirilmesine ihtiyaç duyulmaktadır.

KAYNAKLAR

- [1] Bresolin, C.S., Schneider, P.S., Vielmoand, H.A. ve França, F.H.R. (2006). "Application Of Steam Turbines Simulation Models In Power Generation Systems", Engenharia Térmica (Thermal Engineering), 01:5
- [2] Judes, M., Vigerske, S. ve Tsatsaronis, G. (2009). "Optimization Of The Design and Partial-Load Operation Of Power Plants Using Mixed-Integer Nonlinear Programming", Optimization in the Energy Industry, Springer, sf. 193-220
- [3] Grönman, A. ve Saaresti, T.T. (2011). "Design and Off-Design Performance Of A Supersonic Axial Flow Turbine With Different Stator-Rotor Axial Gaps", Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy, 497:225
- [4] Weir, C.D. (1985) "An Analytical Approach to The Estimation of The Performance of Steam Turbine Cycles Off-Design" Proc Instn Mech Engrs, A1:199
- [5] Cooke, D. H., (1983) "Modeling of Off-Design Multistage Turbine Pressures By Stodola's Ellipse" Bechtel Power Co. Texas
- [6] Kroon, R.P. ve Tobiasz H.J., (1971). "Off-Design Performance of Multistage Turbines" Journal of Engineering for Power January, sf. 21-28
- [7] Petrovic, M. ve Riess W., (1997). "Off-Design Flow Analysis of Low-Pressure Steam Turbines" Proceedings of The Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal Of Power and Energy, 215-224:211
- [8] Dorney, D.J., Griffin, L.W., Hubber, F.W. ve Sondak, D.L. (2003). "Off-Design Performance of a Multi-Stage Supersonic Turbine", 41th Aerospace Sciences Meeting & Exhibit January 2003 / Reno, NV

- [9] O'Brien, J.M. ve Bansal P.K., (2000). "Modelling Of Cogeneration Systems. Part2: Development Of A Quasi-Static Cogeneration Model (Steam Turbine Cogeneration Analysis)" Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy, 125-143:214
- [10] Herzog, N.,Binner, M., Seume, J.R. ve Rothe, K., (2007). "Verification Of Low-Flow Conditions In A Multistage Turbine", Proceedings Of GT2007 Asme Turbo Expo 2007: Power for Land, Sea and Air May 14-17, 2007, Montreal, Canada
- [11] Gerolymos, G.A. ve Hanisch, C., (1999). "Multistage Three-Dimensional Navier-Stokes Computation of Off-Design Operation of a Four-Stage Turbine", Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy, 243:213
- [12] He, J., (1997). "Computation of Unsteady Flow Through Steam Turbine Blade Rows At Partial Admission", Proc. Instn. Mech. Engineers, 197-205:211
- [13] Stastny,M.,Safarik, P., Horejsi, I., ve Matas, R., (1997). "Flow around the Sections of Rotor Blading of a Turbine Stage With Relatively Long Blades at Off-Design Conditions", Proc. Instn. Mech. Engineers, 207-213:211
- [14] Mandal, A.K.,(2005). "Off-design Performance Prediction of Steam Turbines", M.Tech. Project Report, Mech. Engg. Dept., IIT Delhi
- [15] Bhattacharya, S., (2007). "Prediction Of Off-Design Performance Of Steam Turbines and Extraction Steam Flow Optimization", Department Of Mechanical Engineering Indian Institute Of Technology, Delhi
- [16] Republic Of Turkey Prime Ministry Investment Support and Promotion Agency of Turkey, <http://www.invest.gov.tr>, 5 Aralık 2011
- [17] Çengel, Y. ve Boles, M., Thermodynamics: An Engineering Approach, 5th Ed.
- [18] Öztürk, R., (2007). Turbo Makineleri Konstrüksiyonu Ders Notları, YTÜ Basım-Yayın Merkezi, 2. Baskı
- [19] Shlyakhin, P., (2005)., Steam Turbines Theory and Design, University Press of the Pacific, Hawaii
- [20] "Course 234 Module 1 Turbine and Auxiliaries", <http://canteach.candu.org/library/20042401.pdf>, 21 Eylül 2011
- [21] Eyice, S. (1963). Buhar Türbinleri Hesap ve Konstrüksiyonu, Cilt 3, İskender Matbaası, İstanbul

- [22] Özge, A. (1989). Gemi Buhar Türbinleri ve Tesisleri, İTÜ GİDBF Ofset Baskı Atölyesi, İstanbul
- [23] Quinkertz, R., Ulma, A., Gobrecht, E. ve Wechsung, M., (2008). "USC Steam Turbine Technology for Maximum Efficiency and Operational Flexibility", Power-Gen Asia, October, Malaysia
- [24] Murty, S.R. (2009). "Governing System: Overview"
<http://www.scribd.com/doc/6152992/Steam-Turbine-Governing-Systems-Overview>, 27 Eylül 2011
- [25] Industrial Steam Turbine Control, (1992). Woodward Governor Co. USA, App. Note 83403, Revision B
- [26] Buhar Türbinleri Bakımı, <http://www.turbinbakim.com/buharturbini.htm>, 12 Ekim 2011
- [27] Çan Termik Santrali Teknik Bilgiler, <http://www.santraltanitimgrubu.org>, 10 Aralık 2011
- [28] Oktay, Z. (2008). "Investigation Of Coal-Fired Power Plants in Turkey and A Case Study: Can Plant", Applied Thermal Engineering 29

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Asım Sinan KARAKURT
Doğum Tarihi ve Yeri : 30.07.1985 Konya
Yabancı Dili : İngilizce
E-posta : asinan@yildiz.edu.tr

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Y. Lisans	Gemi İnş. ve Gemi Mak. Müh.	Yıldız Teknik Üniversitesi	2012
Lisans	Gemi İnş. ve Gemi Mak. Müh.	Yıldız Teknik Üniversitesi	2010
Lise	Fen Bilimleri	Ereğli Anadolu Lisesi	2004