

YALOVA ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**BİR ENERJİ SANTRALİNDE BUHAR KAZANI BLÖF ATIK ISISININ
GERİ KAZANIMI VE MALİYET ANALİZİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mesut ÖZDİLİM

Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı

Enerji Sistemleri Mühendisliği Programı

2017

YALOVA ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**BİR ENERJİ SANTRALİNDE BUHAR KAZANI BLÖF ATIK ISISININ
GERİ KAZANIMI VE MALİYET ANALİZİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mesut ÖZDİLİM

105103005

Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı

Enerji Sistemleri Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Fikret YÜKSEL

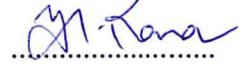
2017

YALOVA Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 105103005 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi **Mesut ÖZDİLİM**, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı "**BİR ENERJİ SANTRALİNDE BUHAR KAZANI BLÖF ATIK ISISININ GERİ KAZANIMI VE MALİYET ANALİZİ**" başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Fikret YÜKSEL
Yalova Üniversitesi



Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Yusuf Ali Kara
Bursa Teknik Üniversitesi



Yrd.Doç. Dr. Mehmet Direk
Yalova Üniversitesi



Prof. Dr. Fikret YÜKSEL
Yalova Üniversitesi



Teslim Tarihi : 25/07/2017
Savunma Tarihi: 06/09/2017

ÖNSÖZ

Günümüz dünyasında enerjinin önemi git gide artmakta olup, artık çalışmaların yoğunlaştığı kısım mevcut enerjinin mümkün olan en verimli şekilde kullanılmasıdır. Gerek tüketimin artması, gerek ise enerji kaynaklarının sınırlılığı ile enerjinin kıymetli hale gelmesi üzerine bu konuda çok sayıda yerli ve yabancı araştırma yapılmıştır ve yapılmaya devam edilmektedir. Literatür araştırması sırasında incelenen çalışmalardan edinilen bilgiler ve son yıllardaki araştırmaların yönlendiği detay proseslere bakılarak mevcut şartların en iyi şekilde değerlendirilmesi amaçlanmıştır. Bu çalışmada ise proses verimsizliğinin birkaç kademeye sahip olan bir revizyon ile iyileştirilmesi üzerine çalışılmıştır.

Çalışmalarımızda destek ve yardımlarını esirgemeyen değerli hocam Prof. Dr. Fikret Yüksel'e en derin teşekkür ve saygılarımı sunarım. Bütün süreç boyunca tecrübeleri ile beni yönlendiren ve çalışmaya katkı veren Yrd. Doç. Dr. Mehmet Direk'e teşekkürü bir borç bilirim.

Çalışmamıza 2016/YL/071 proje numarası ile destek veren Yalova Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) Koordinatörlüğü'ne teşekkür ederiz.

Temmuz 2017

Mesut ÖZDİLİM
Makine Mühendisi

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ	v
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	ix
ŞEKİL LİSTESİ.....	xi
KISALTMALAR	xiii
SİMGELER LİSTESİ	xv
ÖZET.....	xvii
SUMMARY	xix
1. GİRİŞ	1
1.1 Termik Santraller.....	6
1.2 Termik Santral Ekipmanları ve Çevrim Özellikleri	7
1.3 Literatür Tarama.....	13
1.4 Tezin Amacı	17
2. MATERYAL VE YÖNTEM	19
2.1 Enerji ve Ekserji Tanımları	19
2.1.1 Termodinamiğin 1. Kanunu	20
2.1.2 Termodinamiğin 2. Kanunu	21
2.2 Ekserji Analizi.....	23
2.2.1 Ekserjinin Tanımı	23
2.2.2 Ekserji Çeşitleri ve Denklemleri	26
2.3 Ekonomik Analiz.....	29
3. ÖRNEK SANTRAL ANALİZİ	33
3.1 Termik Santralin Tanımı	33
3.2 Santral Çevrimi ve İnceleme Metodu.....	34
3.3 Düğüm Noktaları Hesaplamaları.....	36
4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	39
4.1 İyileştirme Prosesi Dizaynı	40
4.2 İyileştirme Prosesi Termodinamik İncelenmesi.....	42
4.3 İyileştirme Prosesi Ekonomik İncelenmesi	44
KAYNAKLAR	49
ÖZGEÇMİŞ	53



ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 : Enerji ve ekserji kavramlarının karşılaştırılması.....	25
Çizelge 3.1 : Düğüm noktalarından alınan ölçümler	36
Çizelge 3.2 : Düğüm noktalarından hesaplanan enerji ve ekserji değerleri	38
Çizelge 4.1 : Revizyon için gerekli maliyet hesabı	45
Çizelge 4.2 : Revizyon için gerekli işçilik maliyetleri	46



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1: Yıl bazında elektrik üretiminin kaynak gelişimi	2
Şekil 1.2: 2015 ve 2016 yıllarında ham petrol ithalatının dağılım	3
Şekil 1.3: Buhar türbinli enerji santrali genel şeması	7
Şekil 1.4: Santral termodinamik çevrim şeması	11
Şekil 1.5: Çevrim P-V diyagramı	11
Şekil 1.6: Çevrim T-S diyagramı	12
Şekil 1.7: Çevrim düğüm noktaları örneği	14
Şekil 2.1: Değişmez sistem sınırından geçen madde akımının bileşenleri	28
Şekil 3.1: Santral genel akış şeması sistemi	35
Şekil 4.1: Düğüm noktalarından elde edilen ekserji değerleri	39
Şekil 4.2: Yeni sistem akış şeması	41
Şekil 4.3: Revizyon sonrası oluşacak yeni akış şeması	41



KISALTMALAR

EIA	: Energy Information Administration (Enerji Bilgi Kurulu)
EPDK	: Enerji Piyasası Denetleme Kurulu
ABI	: Alçak Basınç Isıtıcısı
YBI	: Yüksek Basınç Isıtıcısı
BSP	: Besi Suyu Pompası
ABT	: Alçak Basınç Türbini
YBT	: Yüksek Basınç Türbini
MEGEP	: Mesleki Eğitim ve Öğretim Sistemini Güçlendirme Projesi
CRF	: Maliyeti Geri Kazanım Faktörü





SİMGELER LİSTESİ

E	: Toplam enerji
E_{iç}	: İç enerji
g	: Yer çekimi
h	: Entalpi
h	: Referans noktasından yüksekliği
KE	:Kinetik enerji
m	: Kütle
P	: Basınç
PE	: Potansiyel Enerji
P_i	: İlk basınç
PN	: Basınç sınıfı
P_s	: Son basınç
Q	: Isı
S	: Entropi
U	: İç enerji
V	: Hacim
V_i	: İlk hacim
V_s	: Son hacim
W	: İş
η_{ter}	:Termik verim
Ex	: Ekserji
Ex_f	: Fiziksel ekserji
Ex_k	:Kimyasal ekserji
Ex_{kin}	: Kinetik ekserji
Ex_{pot}	: Potansiyel ekserji



BİR ENERJİ SANTRALİNDE BUHAR KAZANI BLÖF ATIK ISISININ GERİ KAZANIMI VE MALİYET ANALİZİ

ÖZET

Bu çalışmada, 75 MW_e gücündeki bir buharlı güç santrali üzerinden veriler alınarak enerji ve ekserji analizi yapılmıştır. İncelenen santralin ana üniteleri dikkate alınarak su buhar çevrimine enerji etüdü yapılmıştır. Proses incelenmesi; bu ünitelerin giriş ve çıkışlarında 18 adet düğüm noktası belirlenerek incelenmiştir. Santral dizayn parametreleri ile termodinamik tablolardan alınan değerlerin bir araya getirilmesi ile her ünitenin giriş ve çıkışlarındaki enerji ve ekserji değerleri hesaplanmış ve çıkarılan kayıpların analizleri yapılmıştır. Bu analizlere göre yapılan fizibilitede kazana giren besi suyunun proseste yeterince faydalanılamayan diğer ısı kaynakları ile ısıtılmasının kararı verilmiştir. Sistemdeki iyileştirmeye açık yer; kazan dramdan atılan sürekli blöf olarak belirlenmiştir. Kazandan atılan su ve enerjinin tekrar kullanılması amacıyla yeni bir sistem tasarlanmıştır. Bu sistemde hem basınç ve sıcaklık düşüşü sonrası oluşan flaş buhardan, hem de blöf ile atılan suyun üzerinde taşıdığı enerjiden yararlanılmıştır.

Termodinamik hesaplamalardan sonra sistemin yatırım maliyetini, yıllık kazancını ve bu değerlere bağlı geri dönüş süresini içeren bir termoekonomik analiz ile çalışma tamamlanmıştır. Yapılan ön çalışmada kurulacak sistemin kendini yaklaşık 2 sene içerisinde geri ödeyecek ve sonrasında kayda değer yıllık getirisi olacağı öngörülmüştür.

Anahtar kelimeler: Enerji, Ekserji, Buharlı güç santrali



HEAT RECOVERY AND COST ANALYSIS OF A BOILER BLOW DOWN SYSTEM IN A POWER PLANT

SUMMARY

Energy and exergy analysis of a 75 MWe steam power plant was conducted in this study. It was based on the water-steam cycle of the power plant. Main approach of the process analysis was separating the flow diagram in 18 nodes. The input and output values were calculated for each process which were taken from power plant data and read from thermodynamic tables, also the energy losses were examined in this way. A feasibility study was determined with reference to exergy analysis outputs, the action plan was warming up the boiler feed water with using the energy sources in the process which were not used effectively. Boiler drum's continuous blow down was the best process for improvement. A new system was designed which uses the waste heat and water of the boiler. There would be flash steam with a sudden change in pressure and in addition to heat energy of the blow down condensate.

After completing the thermodynamic calculations the thermoeconomic analysis was made which includes; capital cost, annual income and return on investment value. It was the noticeable result for a project which has a 2 years of and return on investment value.

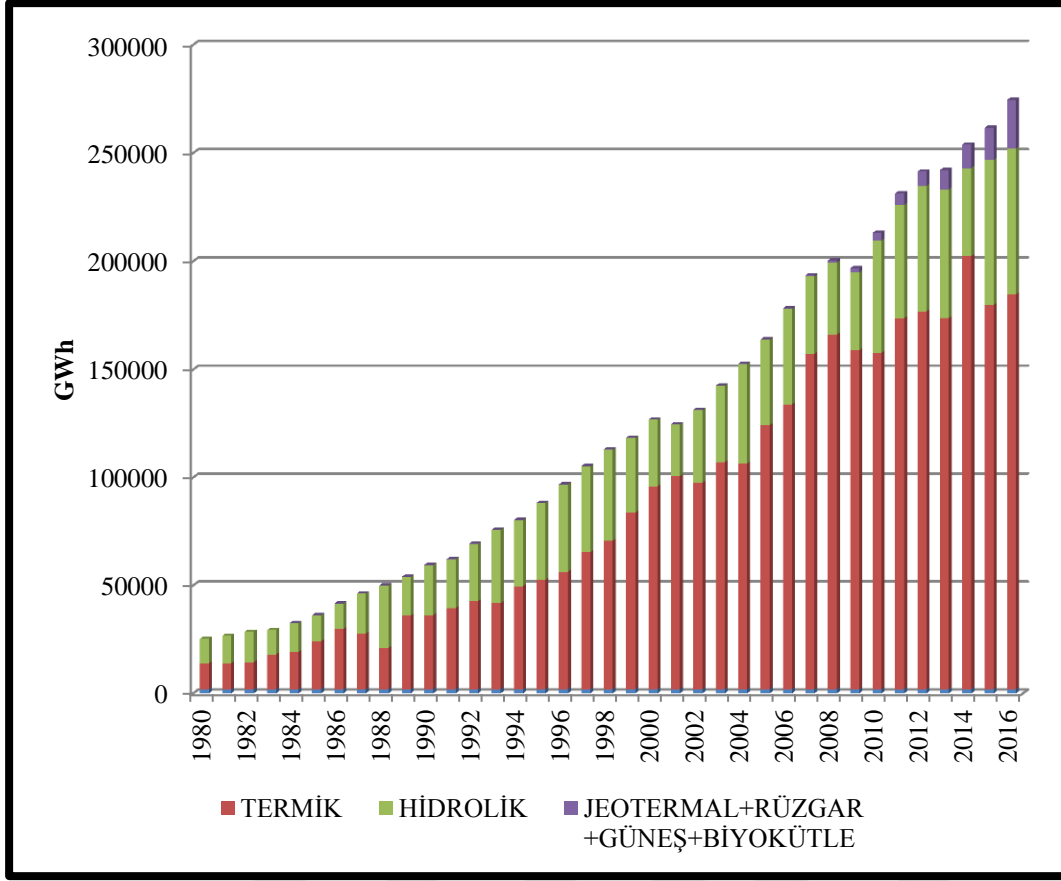
Key words: energy, exergy, steam power plant

1. GİRİŞ

Enerji; kısaca iş yapabilme yeteneği olarak tanımlanır. Gelişmişlik düzeyinin artmasına bağlı olarak enerji, modern yaşamın en temel ihtiyacı haline gelmiştir. Özellikle kullanım kolaylığı ve farklı enerji formlarına dönüştürülebilmesi nedeniyle elektrik ve ısı enerjisinin hayatımızda önemli bir yeri vardır. Fosil enerji kaynaklarının yeryüzüne eşdeğer oranda dağılmış olmaması, yenilenebilir enerji kaynaklarının ise ilk yatırım ve işletme maliyetlerinin yüksek olması gibi sebepler artan dünya nüfusuna eşdeğer enerji arzının sağlanmasını engellemektedir. Sınırlı doğal kaynaklardan elde edilen enerji çeşitleri gün geçtikçe artan talebe bağlı olarak daha da değerli hale gelmektedir. Nüfus artışı, sanayileşme, teknolojinin yaygınlaşması ve refah seviyesinin yükselmesi ile doğru orantılı olarak enerji tüketiminde artış kaçınılmazdır. Enerji temininde farklı kaynakların kullanımının sağlanmasının yanı sıra enerjinin verimli bir şekilde kullanılması, israf edilmemesi zorunluluk haline gelmiştir. (EIA Report 2004)

Mevcut enerji kaynaklarını daha verimli kullanmak, alternatif enerji türlerini geliştirmek ve ihtiyaç duyulan enerji üretimini sağlamak için günümüzde genellikle fosil ve nükleer yakıtlar kullanılmaktadır. Dünya’da olduğu gibi ülkemizde de alternatif enerji kaynakları araştırılması ve mevcut enerji kaynaklarının verimli halde kullanılması çalışmaları yoğun bir şekilde artmaktadır. (Baysal ve Koçyiğit, 2007).

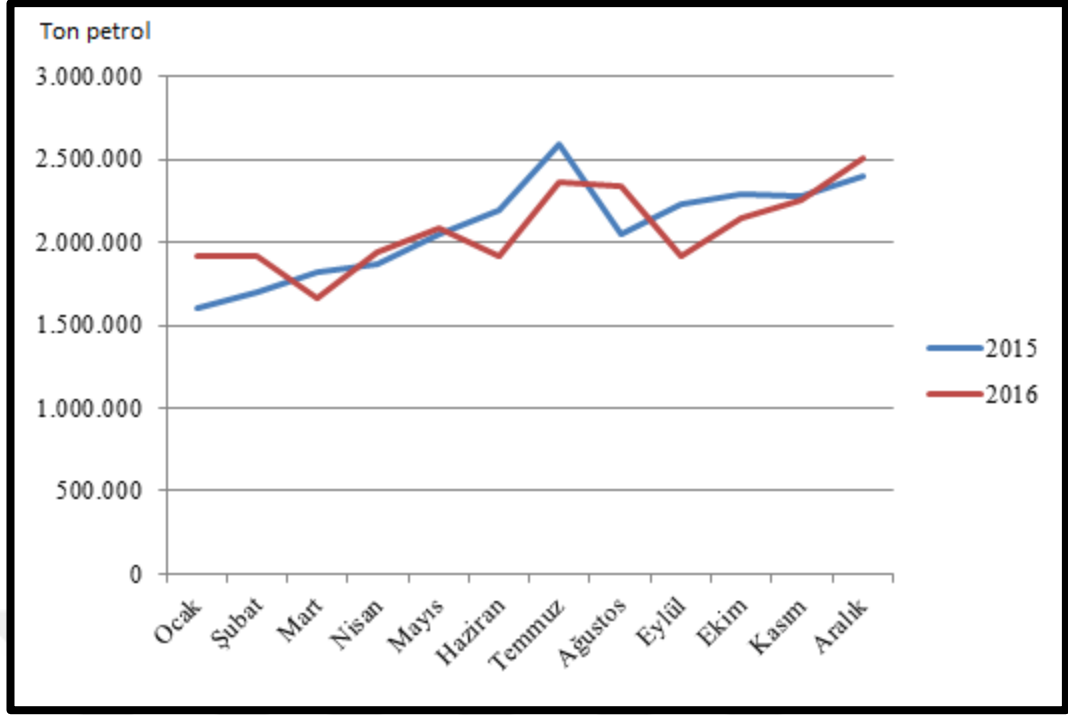
Tüketilen elektrik enerjisinin sağlanması amacıyla termik ve yenilenebilir (rüzgar, güneş, jeotermal) enerji kaynakları kullanılmaktadır. Şekil 1.1 incelendiğinde; yenilenebilir enerji kaynaklarının elektrik enerjisi içerisindeki payının gün geçtikçe arttığı görülmektedir.



Şekil 1.1: Yıl bazında elektrik üretiminin kaynak gelişimi (EPDK elektrik piyasası 2016 yılı gelişim raporu)

Petrol; birincil enerji kaynakları içerisinde ekonomik kalkınmanın önemli bir girdisi olarak büyük bir öneme sahip olmakla birlikte, stratejik bir ürün olma özelliği ile de gündemdeki yerini korumaktadır. Artan ulaşım ihtiyacı, elektrik tüketimi, ısınma gibi ihtiyaçlara paralel olarak yakıt amacıyla kullanımının yanı sıra, türevlerinden elde edilen ürünlerle sanayinin hızla gelişmesine katkı sağlayan önemli bir hammadde olması gibi sebeplerden dolayı petrole duyulan ihtiyaç ise dünyada olduğu gibi ülkemizde de günden güne artmaktadır. Gelişmiş ülkelerdeki enerji tüketimi daha istikrarlı ve orta eğilimli bir artış gösterirken, ülkemizin de içinde olduğu gelişmekte olan ülkelerin enerji tüketimindeki artışın çok daha hızlı gerçekleştiği gözükmektedir.

Petrol sektörü ülkemiz açısından sürekli büyümekte ve gelişmekte olan bir sektördür fakat bununla beraber bu büyümenin hızına yerli üreticimiz yetişemediği için ithalat verileri de gün geçtikçe artmaktadır. Şekil 1.2’de görüleceği üzere ham petrol ithalatımız her geçen gün artarak devam etmektedir.



Şekil 1.2: 2015 ve 2016 yıllarında ham petrol ithalatının dağılımı-ton (EPDK elektrik piyasası 2016 yılı gelişim raporu)

Enerji ihtiyacının büyük bir kısmının kaynağı olan fosil kökenli kaynaklar doğadaki birçok kaynak gibi sınırlıdır. Bu ihtiyacın önümüzdeki zamanlarda karşılanamaması riski, yeni enerji kaynaklarının yönetimini zorunlu hale getirmektedir. Tükenmekte olan enerji kaynaklarının ömrünü uzatmak için mevcut enerjinin de olabilen en verimli şekilde kullanılmasını gerektirmektedir.

Enerji verimliliği, endüstriyel işletmelerde üretimin niteliğine ve niceliğine etki etmeden, birim ürün miktarı başına enerji tüketiminin azaltılması, yani diğer bir deyişle spesifik tüketim olarak açıklanmaktadır. Halihazırda geçerli olan enerji kaynaklarının halen kullanıldığından daha verimli kullanılması, herhangi bir prosesteki kayıpların minimuma indirilmesi ya da daha prosese özgü bir şekilde dizayn edilerek iyileştirilmesi ile sağlanır. (Filiz, 2012)

Enerji üretimi, depolanması, iletilmesi ve kullanımı konularında yapılan çalışmalar her geçen gün önemini artırmaktadır. Enerji verimliliği denildiğinde ifade edilmek istenen, ne kadar etkin kullanıldığı veya enerji dönüşüm sistemlerinin hangi oranlarda dönüşümü gerçekleştirdiğidir. Verimlilik analizleriyle, bir sistem başlangıçtan sona kadar en iyi şekilde tasarlanabilir, mevcut sistemler analiz edilip sistemin çalışması gereken en iyi şartlar belirlenebilir, en az enerji tüketimi ile en

fazla iş elde edilebilir, diğer bir deyişle bir birim ürün elde etmek için daha az enerji tüketecek sistemler elde edilebilir. Kayıpların, tersinmezliklerin nedenleri ve yerleri saptanabilir, kısaca, mevcut enerji, kaynak ve enerji dönüşüm sistemleri en etkin şekilde kullanılabilir. (Mert, 2010)

Enerji santrallerinin iki ana ekipmanı kazanlar ve türbinlerdir. Buhar türbinleri, akışkan olarak kullanılan yüksek basınçlı ve yüksek sıcaklıklı buharın sahip olduğu enerjiyi sabit ve hareketli kanatları vasıtasıyla kinetik enerjiye çevirebilen ısı makineleridir. Bu çevrimin kaynağı olan buhar kazanından gelen akışkanı enerji üretecek şekilde kullandıktan sonra dış ortama yani çevrimdeki kondensere atmakta ve bu şekilde güç üretmektedir. Bu çevrimdeki verim; üretilen her bir kW güce karşılık gelen özgül ısı miktarının en düşük olması durumudur ve bu hal bir türbin için optimum koşul olarak adlandırılır. (Karakurt, 2012)

Kullanım amaçlarına göre 2 ana tip buhar türbini bulunmaktadır. Kondenserli ve karşı basınçlı türbinler sanayinin birçok alanında ihtiyaca göre dizayn edilerek kullanılır. Bu buhar türbinlerini tüm çalışma karakteristikleri farklı olduğu gibi farklı yük şartlarında işletilmeleri de birbirinden farklılık göstermektedir. Kondenserli buhar türbinlerindeki buhar miktarı doğrudan ve sadece üretilen elektriksel gücü etkilemektedir. Karşı basınçlı buhar türbinlerde yapılan reglaj vanasının hem gerekli yüke karşılık gelen elektrik enerjisini hem de ısıtma işlemleri için gerekli buhar miktarını sağlaması gerekir. Isıtma için çekilen bu buhar ise kazana giren besi suyunun ısınmasına yardımcı olacağından sistemin genel verimine doğrudan etki eder. (Eyice, 1963)

Santral verimini arttıran en doğru yolu belirleyebilmek için ise, santral çevrimi ve bu çevrimde bulunan ekipmanlar hakkında detaylı bilgi sahibi olmak gerekir. Buharlı güç santrallerinde, enerji üretmek için kullanılan enerji kaynağının türü fark etmeksizin uygulanan çevrim ve analiz yöntemi aynı tabana dayanır. Tüm buharlı güç santrallerinde, su buharı belirli iki proses limiti arasında incelenir ve çözümleme Carnot çevrimi ile analiz edilir. Çünkü termodinamik çalışmalar sonucunda; iki proses noktası arasında çalışan en yüksek verimli çevrim Carnot çevrimi olarak tanımlanır. Fakat Carnot çevrimi buharlı güç santralleri için gerçek hayatta uygulanabilir bir model olmadığından Carnot çevriminin bir uyarlanması olan Rankine çevrimi ortaya çıkmış olup, mevcut sistemlerin analizinde halen bu çevrim kullanılmaktadır. (Çengel ve Boles, 2007).

Enerjinin korunumu prensibini referans alan Termodinamiğin birinci kanunu, verim analizlerinde arzu edilen ölçüde detay analizi sağlamayabilir, bu durum Termodinamiğin ikinci kanunu ile tanımlanmaktadır. Bir sistemde enerji büyüklüğü ve değerlendirmelerinde atmosfer basıncı ve sıcaklıkları referans alınarak tanımlamalar yapılacak olursa ekserji kavramı kullanılır. Ekserji analizi, termodinamiğin birinci ve ikinci kanunlarını birlikte ele alan ve enerjinin en yüksek seviyede kullanımı veya kullanılabilirliğini ifade eden bir analiz şeklidir. Bu analiz metodunda birinci kanun enerji analizi yapmakta kullanılırken, ikinci kanun tersinir ve tersinmezliği belirlediği için ekserji analizini yapmaya olanak sağlar. (Wall,1986).

Ekserji analizinin ana hedefi sistemlerde verimliliğin artırılmasıdır. Sistem veriminin artırılabilmesi için tersinmezliklerin azaltılması şarttır. Analiz sonucunda belirlenen tersinmezliklerin azaltılabilmesi için gerekli aksiyonlar sıralanır. Bu çalışmalar çerçevesinde sistem verimin mümkün olan en yüksek değere çıkarılması için çalışılır. (Kwon ve Kwak, 2001).

Termodinamiğin birinci yasası temel enerji kavramını incelerken, termodinamiğin ikinci yasası da kullanılabilir enerji kavramını inceler. İkinci yasayla yapılan analiz birinci yasayla yapılan analize oranla daha detaylı ve açıktır. Çünkü kullanılabilir enerjiyle hesaplanan kayıplar birinci yasanın enerji kavramıyla hesaplanan kayıplardan daha net sonuç olarak açıklanabilir. (Özkan, 2009).

Son yıllarda bilim insanları tarafından mevcut enerjinin daha verimli kullanılması ya da kayıp enerjinin geri kazanılması maksadı içeren analizler yoğunluk kazanmıştır. Bu çalışmalar kapsamında, özellikle endüstriyel tesislerdeki ısıl proseslerin enerji ve ekserji analizi yöntemiyle performanslarının değerlendirilmesi hakkında pek çok çalışma yapılmış ve halen de yapılmaya devam edilmektedir. Bu analizler sonucunda bir sistem için enerji haricinde ekserji hesapları da yapılırsa enerji kaliteleri arasındaki fark çıkarılmış olur. Bu nedenle ekserji analizine yapılarak incelenen sistemlerde daha net sonuçlar veren çalışmalar yapılmış olacaktır. Enerji ve ekserji analizinden elde edilen analizler sonucunda ise temel olarak tersinmezliklere bağlı olarak meydana gelen kayıpların tespit edilmesi ve sistemde yapılması gereken iyileştirmelerin belirlenmesi yatmaktadır. (Ünal, 2009).

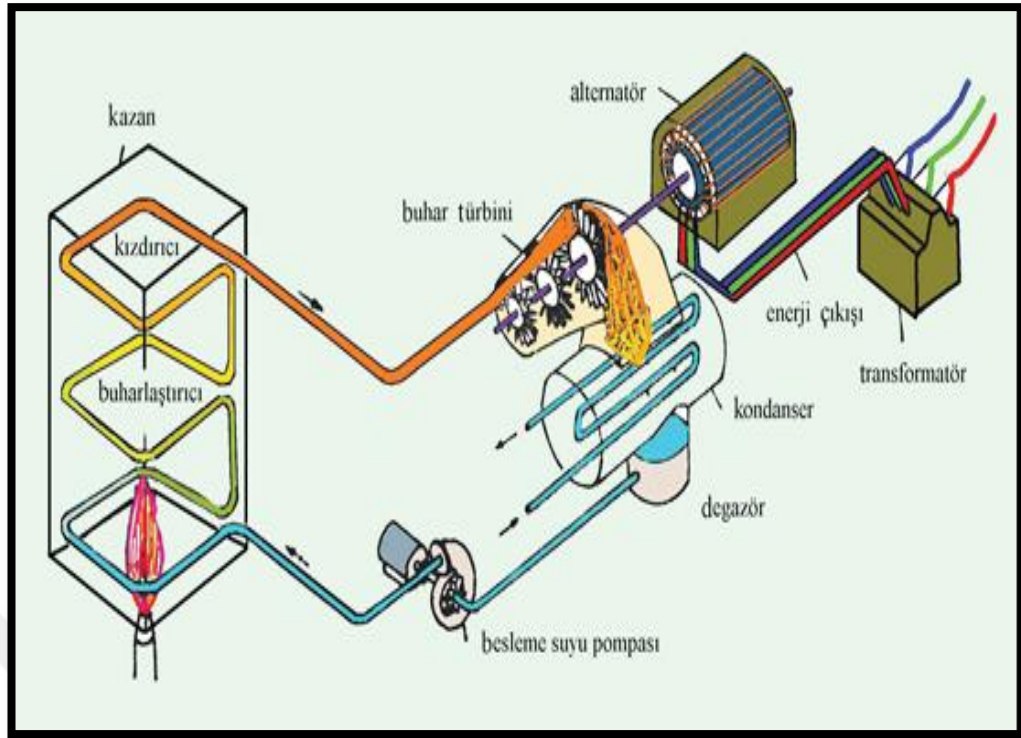
1.1. Termik Santraller

Doğadaki her türlü farklı kaynaktan elektrik enerjisi üreten kuruluşlara enerji santrali denir. Elektrik santralleri, başka biçimlerdeki (termik, nükleer, hidrolik, jeotermal, güneş, rüzgâr, gelgit vb.) enerji türünü elektrik enerjisine dönüştürmek amacıyla bir araya getirilmiş donanımlardan oluşan işletmelerdir. Günümüzdeki güçlü donanımların büyük kısmı, hidrolik ve termik santrallerden meydana gelmektedir. Türü ne olursa olsun her elektrik santrali; temel olarak bir enerji kaynağı, hareketlendirici bir aygıt, bir alternatör ve dönüştürme istasyonundan oluşur.

Katı, sıvı, gaz halinde bulunan kaynağın uygun şartlarda ve uygun ortamda yakılarak yakıtın verdiği ısı enerjisinden ve genleşmeden faydalanılarak mekanik enerji elde edilir. Şekil 1.3'te görüleceği üzere; bu sırada kazanda bulunan sudan, yüksek sıcaklıkta yüksek basınçlı buhar elde edilir. Elde edilen yüksek basınçlı buhar, buhar türbinine gönderilerek mekanik enerji elde edilir. Buhar türbinine akuple olan alternatörde bu enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürür. Bu prensiple çalışan termik santrallere buhar çevrimli santraller denir.

Buhar türbinli santrallerde yakıt olarak kömür, fueloil, doğal gaz ve büyük şehirlerin çöp atıkları vb. kullanılır. Termik santraller, üretilen elektrik enerjisinin maliyetini daha fazla artırmamak için kullanılan yakıtın bulunduğu yerin yakınına kurulur. Santralin kurulacağı yere yakın, büyük su kaynağının da bulunması gerekir.

Detaya inildiğinde bir buhar türbinli termik santralin çalışması şu şekildedir: Daha öncesinde çeşitli aşamalardan geçirilerek şartlandırılmış ve içerisindeki çözünmüş gazları atılmış olan özel besleme suyu, kazan besi suyu pompası ile kazana basılır. Kazanda ısıtılan su ilk önce buharlaşır, sonra kızdırıcılardan geçerek kızdırılır yani tamamen kızgın buhar şartlarına ulaşır. Elde edilen kızgın buhar, buhar türbinine gönderilir. Buhar türbininin kanatlarına çarpan buhar, türbini döndürür. Buhar türbinine bağlı alternatör bu dönme şeklindeki mekanik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürür. Alternatör çıkışı bir yükseltici trafo ile enerji nakil hatlarına verilir. Buhar türbininde işi biten çürük buhar, kondenser denilen yoğunlaştırıcılara gelerek tekrar su haline dönüştürülür ve besleme suyu pompası ile tekrar kazana girer. Bu su-buhar döngüsü sürekli devam ederek elektrik enerjisi üretimi gerçekleşmiş olur.



Şekil 1.3: Buhar türbinli enerji santrali genel şeması (MEGEP, 2008)

1.2. Termik Santral Ekipmanları ve Çevrim Özellikleri

Enerji santralleri; buhar kazanı, türbini, alternatörü ve yoğuşturucusu ile bir bütün olmakla birlikte çalışma sahasında her bir sistem farklı bir ünite olarak değerlendirilir. Bu sebeple enerji santrallerinin her bir ekipmanı ayrı ayrı değerlendirilmiştir.

Buhar kazanı, yanma sonucu açığa çıkan ısı enerjisini suya aktararak buhar üretimini sağlayan sistemlerdir. Kazanda üretilen yüksek basınç ve sıcaklığa sahip buhar, türbin kanatlarını döndürür ve elektrik üretimini sağlar. Buhar kazanları suyun sirkülasyon tipine, çalışma sıcaklığına, basıncına, imalat malzemesine ve en önemlisi yakıt çeşidine göre sınıflandırılır. Termik santraller gibi büyük kapasitelere ihtiyaç duyulan işletmelerde genel olarak, su borulu ve alev-duman borulu kazan tipleri kullanılır. Su borulu kazanlarda, içinde su bulunan boruların dışından yanma ürünü alev ve duman geçer. Alev-duman borulu kazanlarda ise yanma sonucu oluşan buhar boruların içinden geçerek o sırada etrafından geçen suya enerjisini verir ve onu su buharına dönüştürür. Alev borulu kazanların yatırım maliyeti düşüktür. Su hacimleri fazladır fakat suyun dolaşımı yavaştır. Bu nedenle sistemdeki buhar ihtiyacını karşılamaları zaman alabilir. Su borulu kazanlarda ise borular alev borulu kazana

göre daha küçük hacimlidir. Bu nedenle yüksek basınç değerlerine rahatlıkla çıkılabilir. Su borulu kazanların verimi daha yüksektir. Buhar ihtiyacını hızlıca karşılayabilirler ve aynı ağırlıktaki alev borulu kazana göre daha az metal ağırlığı içerirler. Bu belirtilen avantajlar ve dezavantajlar göz önüne alındığında endüstride inşa edilen buhar ve elektrik üretimi amaçlı enerji sistemlerinde su borulu kazan uygulamaları daha sık görülmektedir. (Breeze, 2014)

Kazan besleme pompası, buhar kazanına su göndermek için kullanılan pompa türüdür. Su çevrimin en yüksek basınç değerine yani buhar kazanı basınç değerine ulaşır. Bu değer sistemin kritik üstü ve ya kritik altı olmasına göre değişkenlik gösterir. Kazan besleme suyu pompası dizayn parametrelerinin belirlenmesinde kazan boruları ve kızdırıcı demetleri arasındaki basınç kaybı etkili olur. Türbin girişindeki buhar basıncına su-buhar çevriminde oluşan basınç kaybı eklenmesi ile çıkan değer kazan besleme suyu pompasının çıkış basıncına eşit olur. Bu tip pompalarda, pistonlu ya da santrifüj pompa çeşidi kullanılabilir fakat kazanların işletme basıncı yükseldikçe, pistonlu pompa kullanımı zorlaşır. Bunun nedeni kazanda meydana gelebilecek ve kazan yapısına zarar verebilecek şiddetli titreşimlerin oluşmasıdır. Bunu engellemek için genellikle kademeli santrifüj pompa kullanımı tercih edilir.

Buhar türbini, yüksek basınç ve sıcaklık değerine sahip buharın sahip olduğu kinetik enerjinin, mekanik enerjiye dönüştürüldüğü sistemlere buhar türbini denir. Dünya üzerindeki elektrik üretiminin önemli bir bölümü buhar türbinleri vasıtasıyla yapılmaktadır. Termik santrallerdeki türbinler genelde yüksek, orta ve alçak basınç değerine sahip türbinler kullanılır. Bu türbinlerdeki kanatlar basınç düştükçe genişler, hatta alçak basınç türbini, tek bir türbinden oluşursa çok büyük olacağı için aynı enerjiyi sağlayan birkaç türbinden meydana gelebilir. Elde edilen bu mekanik enerji kanatlar vasıtasıyla mil iletilir. Kademelerinin sayısına göre türbinin yani üretim kapasitesinin büyüklüğü belirli olur. Eğer enerji üretimini yapacak türbin küçük kapasiteli bir türbin ise sadece yüksek ve alçak basınç kademelerinden de oluşabilir. Bütün türbinler tek bir mil üzerine monte edilebilir, alçak basınç türbininin kanat uçlarına etki eden kuvveti azaltmak için, daha düşük hızla dönen farklı bir mil üzerinde bulunduğu örneklerde vardır. Fakat hangi uygulama olursa olsun tüm miller birbirine kaplin ile bağlıdır ki bu sayede miller arası yani türbin rotorundan jeneratör miline güç aktarımı sağlanmış olur.

Karter ya da dış gövde, türbinlerin en dış kısmını oluşturur. Alt ve üst karterden meydana gelir. Türbinin dış kuvvetlere karşı korunmasını sağlar. İki basınç basamağının birbirinden ayrılmasını sağlar. İçerisinde bulundurduğu sabit kanatlar, buharın basınç enerjisinin kinetik enerjiye dönüştürüldüğü ve hareketli kanatlara uygun bir açı ve hızla gönderilmesini sağlayan elemanlara denir. Sızdırmazlık ya da genel adıyla salmastralar ise türbine giren buharın kademelerindeki boşluklardan veya rotorun statordan dışarı çıktığı bölgedeki kaçağı azaltmak için kullanılırlar. Bir buhar türbininde, türbin milini taşıyan taşıyıcı yataklar ve türbin içerisindeki aksel kuvvetleri karşılayan aksel yataklar kullanılmaktadır. (Küçükşahin, F., 2007)

Yoğuşum suyu pompası kondense olan çürük buharın degazöre ulaşmasını sağlayan pompalara denir. Genellikle yüksek debilere gerek duyulduğundan santrifüj pompa çeşidi kullanılır ve elektrik motoruyla çalıştırılırlar. Bu pompaların kritikliği nedeniyle yedekli olması gerekmektedir hatta bazı uygulamalarda buhar türbiniyle çalıştırılan yani ara buhar alınarak tahrik edilen tipleri de mevcuttur.

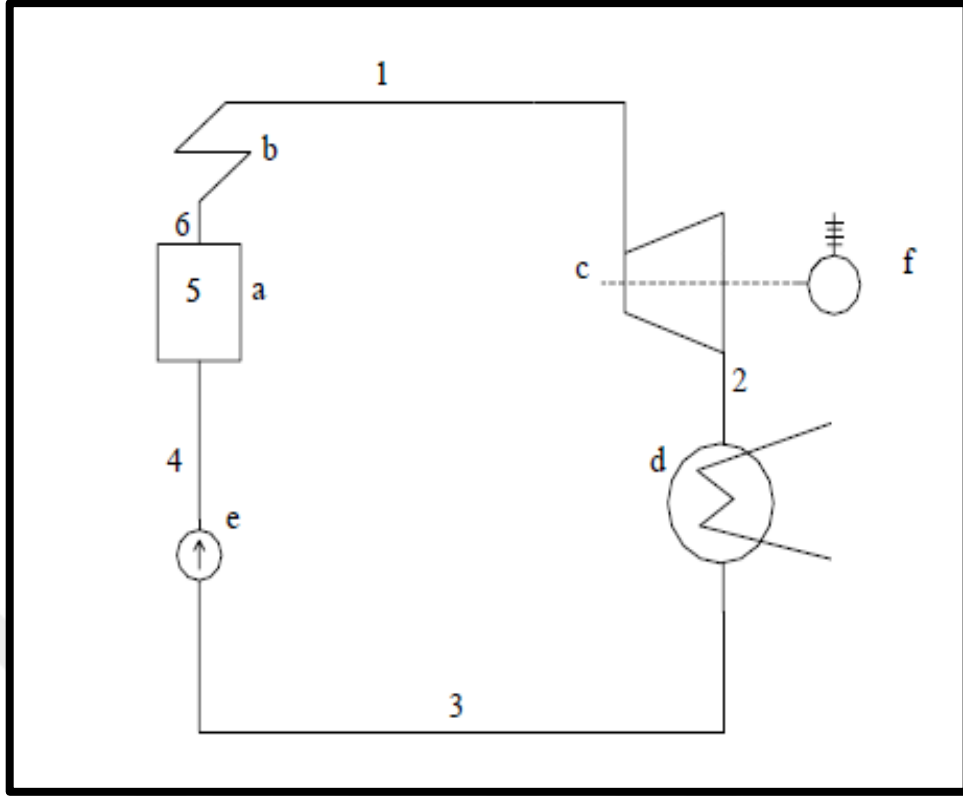
Jeneratör, türbin mili ya da milleri kaplinler vasıtasıyla jeneratöre bağlıdır ve böylece mekanik dönme hareketini elektrik enerjisine çevirmeyi başarırlar. Bir termik santralin olmazsa olmazıdır ve güç şebekesine alternatif akım sağlamak üzere tasarlanmıştır. Bir ikaz akımı verilmesi sonucu oluşan gerilim, yükseltici bir trafo yardımıyla kolaylıkla artırılıp azaltılabildiği için alternatif akım kullanımı tercih edilmiştir. Uzak mesafelere elektrik iletilmek üzere yüksek voltaj ve düşük akım değeri tercih edilir. Jeneratör çıkışında yükseltilecek ve iletim hattı ile istenen noktalara taşınan elektrik enerjisi tüketiciye ulaştırılmadan önce bu sefer bir indirgeme trafosu ile gerilimi düşürülerek sonlanır. (Littler, 1991)

Kondenser (Yoğuşturucu), türbinden çıkan çürük buharın sıvı faza gelmesini sağlayan bir tür ısı değiştiricisidir. Eğer türbin çıkışındaki buhar direkt olarak buhar kazanına basılmak istenseydi, türbinde üretilecek güçten daha fazla basma gücüne ihtiyaç duyulurdu. Bu yüzden çıkan buhar, soğutma suyu vasıtasıyla kondens haline getirilir yani tamimiyle yoğuşturulur. Bu soğutma suyu sistemi ya kapalı çevrim ya da açık çevrim olabilir. Açık çevrimde deniz suyunun aşındırıcı etkisi nedeniyle kullanılacak malzemelerin yatırım ve işletme maliyetleri fazla olacağından genelde kapalı çevrim kullanılır. Yani yoğuşturmayı sağlayan suyun soğutulması ise dışarıdan alınan ikinci bir su kaynağı ile yapılır.

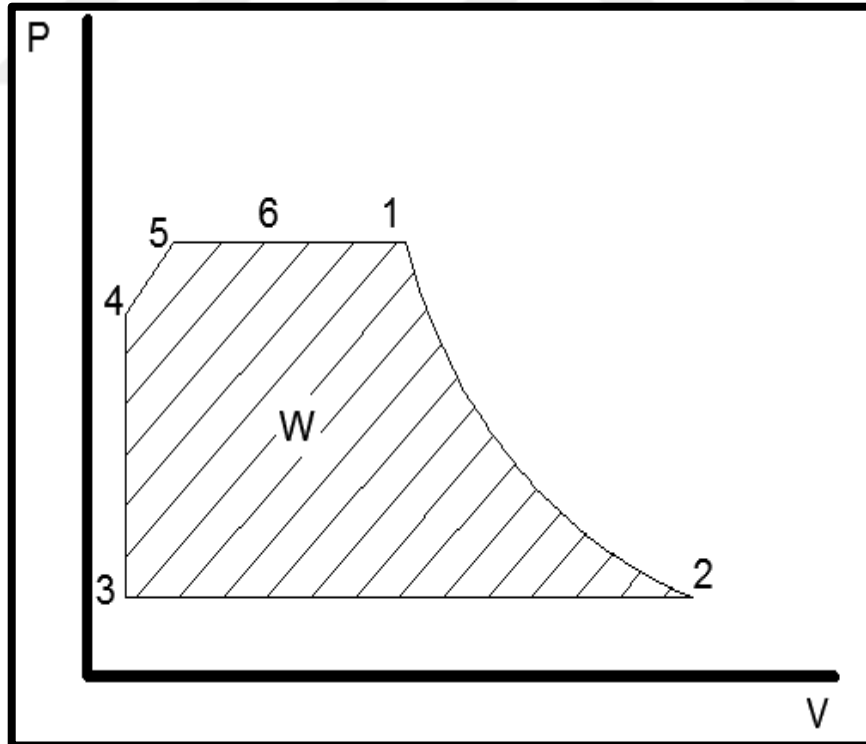
Soğutma suyu pompaları, bu ikincil soğutma suyu kaynağı (deniz veya nehir) ile tesis arasındaki dolanımını sağlar. Bu sistemlerde; soğutma suyu pompalarına ek olarak ısı alış verişini sağlayan büyük eşanjör sistemleri de bulunur. Soğutma suyu sistemlerinin tek görevi kondenser ile aradaki çevrimi sağlamak değildir. Bu sistemler; tesisdeki yağ soğutma eşanjörlerine ve jeneratörlerin soğutma sistemlerine (hava ya da hidrojen) de hizmet etmektedir. (Breeze, 2014)

Şekil 1.4 bir buhar santrali en basit şekliyle gösterilmiştir. Kazanın buharlaştırıcı bölümünde (a) yüksek basınç altında (kazan çıkış basıncından yüksek) bulunan besleme suyu, düşük bir sıcaklıktan (kondense sıcaklığı) buharlaşma sıcaklığına kadar izobar olarak ısıtılır ve buharlaştırılır. Doymuş buharın sıcaklığı daha sonra kızdırıcılarda (b) yükseltilir. Buradan çıkan kızgın buharın sıcaklığına “taze buhar sıcaklığı” denir. Kızgın buhar daha sonra türbinde (c) adyabatik olarak kondenser basıncına kadar genişler. Bu genişleme sırasında buhar sıcaklığı da kondense sıcaklığına kadar düşer. Türbinden çıkan çürük buhar kondenserde (d) izobar ve izotermik olarak yoğunlaştırılır. Bu yoğunlaşmanın sağlanabilmesi için, soğutma suyu ile buharın kondensasyon ısısının alınması gerekir. Son olarak kazan besleme suyu pompası (e) ile tekrar adyabatik olarak kazan basıncına çıkartılır. Borulardaki sürtünme ve ısı kayıplarını dikkate almazsak, bu çevrimde besleme suyu pompası çıkışından türbin girişine kadar devam eden sabit basınca kazan basıncı, türbin çıkışından besleme suyu pompası girişine kadar devam eden sabit basınca da kondenser basıncı denir. Bu kez de sıcaklıkların kayıpları ihmal edilirse taze buhar sıcaklığı kızdırıcı çıkışından türbin girişine kadar, kondensat sıcaklığı ise türbin çıkışından kazan girişine kadar sabit olarak devam eder. Yani yüksek basınç besleme suyu pompasında, yüksek sıcaklık ise kazanda elde edilir. Her ikisi de türbinde düşüşe uğrar. Bu çevrime Clausius-Rankine çevrimi denir. Clausius-Rankine çevriminin P-V diyagramı şekil 1.5’te verilmiştir. (Cengel ve Boles, 2007)

Clausius-Rankine çevrimi, buhar santrallerinin gerçek su-buhar çevrimi ile karşılaştırılabilmesi yönünden önem taşır. Bu çevrim ideal bir çevrimdir. Çünkü pratikteki izobar ve adyabatik durum değişikliklerinden meydana gelen sapmalar yok sayılmıştır.



Şekil 1.4: Santral termodinamik çevrimi şeması



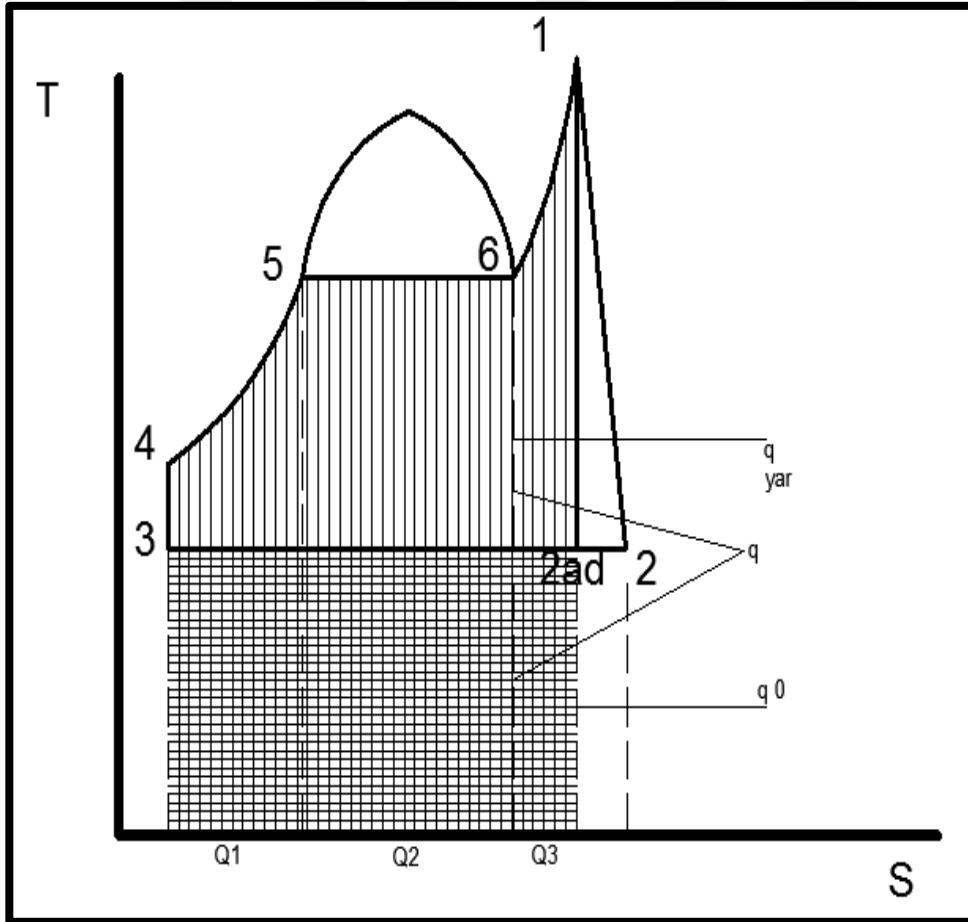
Şekil 1.5: Çevrimin P-V diagramı

Besleme suyu pompası 3 nolu noktadaki suyu kondenser basıncından kazan basıncına kadar sıkıştırır (durum 4). Bu, izentropik bir işlemdir. Durum 4'teki su kazanda, izobar olarak durum 5'e kadar ısıtılır ve bu arada suya q_1 ısı verilmış olur. Durum 5'te kazan basıncının karşılığı olan buharlaşma sıcaklığına erişilmiştir. Daha sonra suya q_2 ısı vererek 5-6 çizgisi boyunca buharlaştırılır ve sonunda q_3 ısının verilmesiyle 6-1 çizgisi boyunca kızdırılır. Şu halde kazana verilen toplam ısı miktarı

$$q = q_1 + q_2 + q_3 \quad (1.1)$$

Clausius-Rankine çevriminde şekil 1.4 ve 1.5' teki sayılar kullanılarak şekil 1.6'daki T-S diyagramında yeniden gösterilmiştir.

T_1 sıcaklığına kadar kızdırılmış olan buhar, türbinde kondenser basıncına kadar eş entropide genişletilir (durum 2ad). Türbinden çıkan buhar, kondenserde ısını vererek yoğuşur. Bu ısı ise q_0 ile gösterilmiştir. (Rosen ve Dinçer, 2004)



Şekil 1.6: Çevrimin T-S diyagramı

1.3. Literatür Tarama

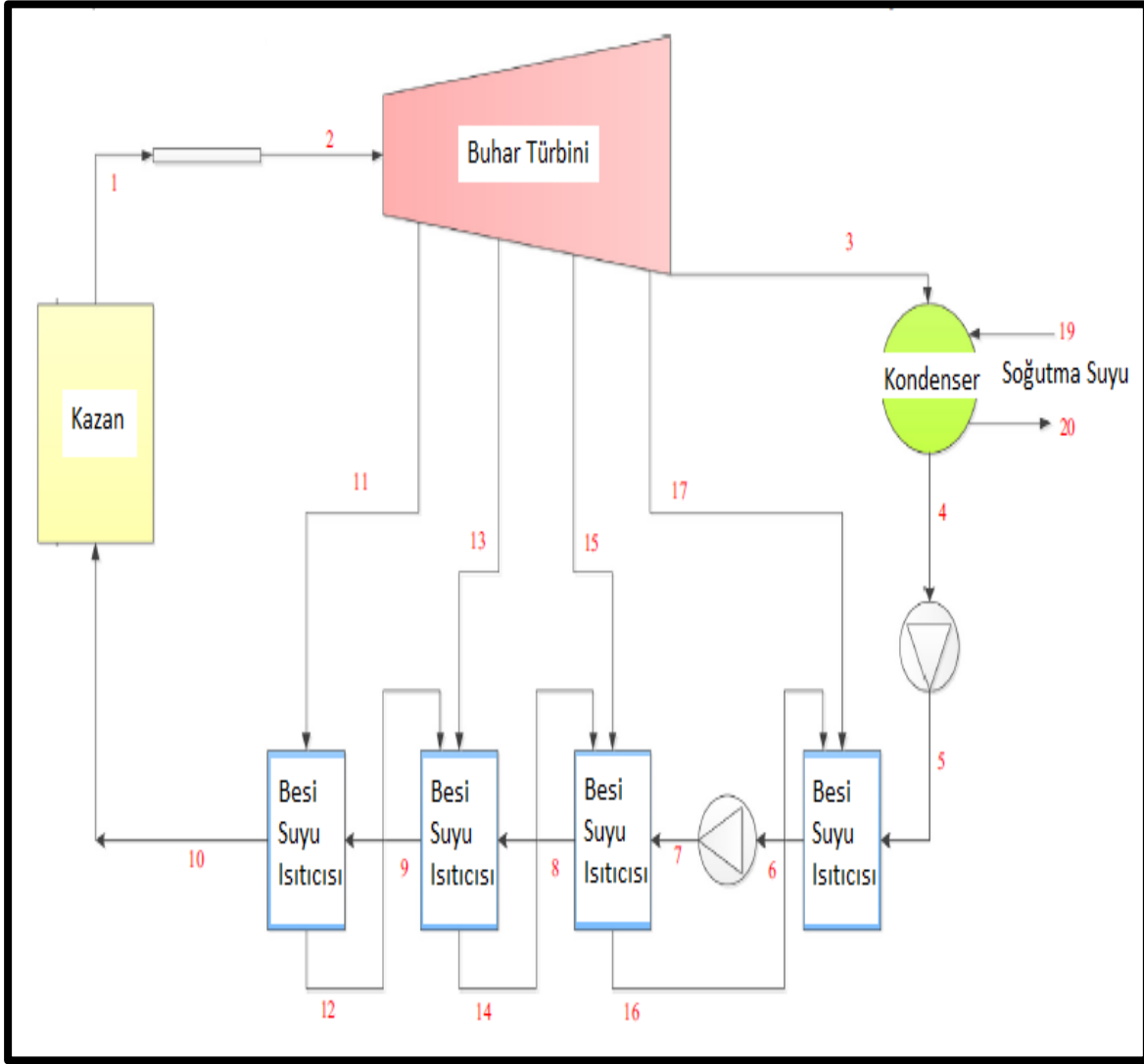
Literatür incelendiğinde termik santrallerde verim arttırma ile ilgili birçok çalışma yapıldığı görülmektedir. Bu çalışmalarda ise başvurulan yöntemler farklı olsalar da temelde izlenen yol sistemden geri kazanılan enerjiyi prosesin farklı noktalarında değerlendirmek üzerine yoğunlaştığı anlaşılmaktadır.

Ege (2012) ekserji analizini esas alarak termodinamiğin ikinci kanunu ile linyit yakıtlı santralde termoekonomi uygulaması kullanarak çalışma yapmıştır. Santralin dizaynındaki parametreler ile işletme koşullarındaki ölçümleri, enerji ve ekserji verimlerini belirlemek, santralin birinci ve ikinci kanun verimindeki belirsizlik miktarını hesaplamak bu belirsizliğe yol açan etmenleri saptamak için kullanmıştır.

Çeşitli kriterlere göre belirlenen Afşin-Elbistan B Santrali çalışma örneği olarak ele alınmıştır. Kömürün ekserjisinin belirlenmesinde literatürde kullanılan farklı model ve yöntemler ışığında, santralin verimliliği incelenmiştir. Santralin enerji ve ekserji veriminde belirsizliğe yol açan faktörler arasında en önemlileri sırasıyla; kömürün kalorifik değeri, elektrik çıkışının akım-gerilim trafosundaki ölçümü, kömürün akışı ve kazan yükündeki belirsizlikler olarak belirlenmiştir.

Eskin, N. ve arkadaşları (2009) kömürle çalışan akışkan yataklı bir kazana sahip enerji santralindeki bir buhar türbininin termodinamik performansında işletme parametrelerinin etkilerini incelemiştir. Kazan ya da yakma tipinden bağımsız olarak buhar parametrelerindeki değişkenlerin buhar türbinin performansına olan etkilerini termodinamiğin birinci ve ikinci yasası üzerine kurulu geliştirilmiş bir model kullanılarak analiz etmişlerdir. Yapılan teorik analiz sonuçları ele alındığında santralin işletme değerleri ile büyük bir uyum gösterdiği yani modelin gayet başarılı olduğu görülmüştür. Proses parametrelerinde yapılan değişiklikler ile sistemin birinci ve ikinci yasa verimlerinin %5,1 ve %5,2 arttığı hesaplanmıştır. Geliştirilen modelde sistemde meydana gelen tersinmezliklerin miktarı her bir bölüm için hesaplanmıştır.

Afsaneh ve arkadaşları (2017) atık ısı ve suyun geri kazanımı için önerdikleri yeni sistemini ekserji ve ekonomik analizini gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışmalarında sistemin enerji ve ekserji analizi yapmışlardır. Bu analizlerde her bir ekipman için giriş ve çıkışlarındaki proses parametreleri alınmış olup bu proses parametrelerinin santral çevrimindeki yerlerinin tam olarak belirlenmesi için düğüm noktaları tayin edilerek Şekil 3.5'te gösterilen proses akış şemasından faydalanmışlardır.



Şekil 1.7: Çevrimin düğüm noktaları örneği (Norouzzian, A., Mohammadia, A., Bidi, M., and Ahmadi, M.H., 2017)

Erdem ve arkadaşları (2009) çalışmalarında Türkiye’de kömürle çalışan 9 adet termik santrallerin enerji ve ekserji analizleri üzerine kapsamlı bir araştırma yapmışlar, ekipmanların enerji, ekserji değerlerini ve verimlerini ortaya koymuşlardır. Çalışmanın temelinde her bir santral için kütle-enerji denkliği denklemleri kurmuşlar ve birbirleri arasındaki farklılıkları belirlemiştir. Yapılan ekserji analizlerinde üniteler içerisindeki ekipmanların verimsizlikleri ve dikkat çeken proses noktalarına değinmişlerdir. Daha sonra ise bu noktalardaki yapılabilecek muhtemel iyileştirmeler için alternatif metotlar önermişlerdir.

Tontu (2006) 660 MW güce sahip bir santralde üç farklı çalışma durumunda (%100, %70 ve %40) enerji ve ekserji analizi uygulamıştır. Sistemi oluşturan her bir

ekipman ayrı ayrı incelenmiş en fazla enerji ve ekserji kaybı olan ekipmanları belirlenmiş olup ayrıca sistemi oluşturan ekipmanların faydalı güç, tersinir güç ve tersinmezlik miktarları üzerindeki etkisi incelenmiştir. Sonuç olarak; üç farklı yükte de en fazla enerji kaybı kondenserde olduğu tespit edilmiş ve analiz için yapılan hesaplamaların detayları ayrıca verilmiştir. Sonrasında ise bu kaybın azaltılması için çalışan öneriler sonrası gerçekleşecek iyileştirme sonucunda verimin ulaşabileceği sayısal veriler sonuca eklenmiştir.

T. Srinivas ve arkadaşları (2007) buharlı bir enerji santrali çevrimin performansı ve bu performansa kazan besi suyu ısıtıcılarının etkisi üzerine bir çalışma yapmışlardır. Bu çalışmalarında kazan besi suyunu ısıtan eşanjörlerin sayısının etkisini incelemek amacıyla bir matematiksel formülasyon kullanarak çevrimin termodinamik analizini yapmışlardır. Bu çalışmada her bir farklı proses örneğinde kullanılan kazan besleme suyu ısıtıcı eşanjörlerinin sayısı ve bu örneklerdeki performans hesaplamalarının ayrı ayrı analiz edilmiştir. Yapılan hesaplamalar sonucunda çevrim verimindeki en büyük artışın ilk kademeye besleme suyu ısıtıcısı eklendiğinde meydana geldiği tespit edilmiştir

S. Farhad ve arkadaşları (2008) buhar türbinli santrallerde ekserji analizi üzerine kurulu bir metot uygulayarak kazan besleme suyu ısıtıcılarında inceleme yapan bir çalışma yapmışlardır. Isı transferinden kaynaklanan tersinmezlikleri azaltmak bu çalışmalarının temelini oluşturmaktadır. Bu metodun etkilerini göstermek için 4 farklı tip buhar türbini içeren farklı santraller seçilmiş olup, çalışmadaki metodun uygulanması ile yakıt tüketiminin ve kondenser yükünün azaltılacağı sonucu çıkarılmıştır. Bu sonuca bağlı olarak kazan besleme suyu ısıtıcıları ve türbin ekserji verimlerinin arttığı tespit edilmiştir. Bu çalışma sonucunda verimin % 0,3–1,3 aralığında arttığı ortaya çıkmıştır. Verimdeki bu tip artışların ise gerçek hayatta işletme maliyetlerine ne kadar büyük katkı sağlayacağı yine bu çalışmada rakamsal olarak ifade edilmiştir. Çalışılan buhar türbinli santrallerin yıllık çalışma zamanının 8000 saat olarak kabul edilmesi halinde söz konusu çalışmadaki örnek santralde yıllık fosil yakıt tüketiminde 64.000 ton azalma olacağı hesaplanmıştır.

Gupta ve Kaushik (2009) geleneksel bir termik santralde besleme suyunun ısıtılması için güneş enerjisinden faydalanılmasını amaçlayan bir çalışma yapmışlardır. Bu çalışmalarında geleneksel olarak Rankine çevrimine göre çalışan ve bir santrali ele alıp, güneş enerjisinden faydalanmak için ekserji analizinden faydalanılmıştır. Bu

sistemden, benzeri olan santrallere göre daha fazla iş elde edilmiştir. Çalışmada; 220MW ısı gücündeki akaryakıt kullanan termal güç santrali ele alınmış olup 500 kW gücündeki bir güneş paneli ile de besleme suyunu ısıtmada yardımcı olarak faydalanılmasının etkileri incelenmiştir. Güneş enerjisi kullanıldığında güneş enerjisinin çıktısı 59,31 2kW olurken, santralin ekstra güç çıktısı 90,27 kW olmaktadır.

Vandani ve arkadaşları (2015) İran'da bulunan iki santraldeki benzer tip atık ısı kazanlarının işletmesel parametrelerini inceleyip, verim üzerindeki en büyük etkisi olan kısımlar için ekserji analizi yapmışlardır. İlk etapta çevrimin en dikkat çeken kısmını, degazörde kullanılan yüksek buhar iç tüketimi olarak belirlemişlerdir. Çalışmanın detayında ise kazan dram sürekli blöfün içerdiği enerji üzerine yoğunlaşmışlardır. Bu enerjiden faydalanmak adına yeni bir dizayn yaparak santral verimini % 1,86 arttırmak suretiyle % 30,66 değerine ulaştırmışlardır. Bu verim artışını ise; dram blöfünden alınan enerjisi yüksek yüksek basınçlı kondensin bir tanka alınarak, flaş buhar oluşturması ve bu buharın degazörde kullanılması ile gerçekleştirmişlerdir.

Adibhatla, ve Kaushik (2017) ise enerji santrallerinin enerji tüketimleri üzerine bir çalışma yapmışlardır. Kazan dram daimi blöf ile atılan 82.5 kg/s enerjisi yüksek suyun bir atık ısı olarak kullanılmasını sağlayan ek eşanjör sistemi dizayn ederek 1 yıldan daha kısa süreden yatırım maliyetine geri ödeyen bir sistem tasarlamışlardır. Bu enerji tasarrufunun yanı sıra günümüz dünyasında su kaynaklarının önemine ve sağlanacak su tasarrufuna da değinmişlerdir.

Farklı çalışmalarda verim artışına gidildiğini yukarıda örnekleri verilen çalışmalarda görebiliriz. Bu prosesler içerisinde başvurulan yöntemlerinde başında besi suyunun ısıtılması gelmektedir. Besi suyunun ısıtılması durumunda kazana giren suyun enerjisi artmış olacağından kızgın buhar oluşması için ihtiyaç duyduğu enerji azalacaktır. Katkının mümkün oldukça kayda değer olması için doğru ısı kaynağı kullanılması ve bu kaynaktan mümkün olan en fazla yöntem ile fayda sağlanması üzerine detay analizler yapılmıştır. Bu prosesin sürekli olmasıyla iyileştirme santral çalıştığı sürece enerji kazanmaya devam edecek ve gerçekleştirdiği kazanç ise santral çevrim maliyetine büyük ve sürekli katkılar sağlayacaktır.

1.4. Tezin Amacı

Güç santrallerinde kayıpların en yüksek seviyede olduğu yani geliştirilmeye en açık bölümlerin, zorunlu olarak atılan buhar ve blöf edilen kondens noktalarındaki enerji çıkışlarının olduğu proseslerdir. Bu noktalarda santraldeki su çevrimi kaynaklı mutlaka blöf ya da drenaj edilmesi gereken noktalar vardır. Su-buhar çevrimi içerisindeki safsızlıkların atılması bir santral için şart olup, bu denli yüksek enerji kaybının olduğu bir proses, santralin başka bir prosesi ile ısı alış verişi yapacak yeni bir sistem ile entegre edilmesiyle enerjinin daha verimli kullanılmasına imkan verebilir.

Bu çalışmada; mevcut bir buhar santralinin verimliliğinin artırılması üzerine çalışılmıştır. Mevcut termik santral; 300 t/h buhar sağlayabilen bir buhar kazanını bünyesinde bulundurmaktadır. Kazandan elde edilen buhar, buhar türbininden geçirilerek elektrik enerjisi elde edilmektedir. Enerji santralının buhar döngüsü içerisindeki her bir ana ekipman geçişi düğüm noktası olarak tanımlanmış, incelenen düğüm noktalarından geçen akışkanın niteliksel ve niceliksel birçok özelliği saptanmıştır. Her bir düğüm noktasındaki enerji değişimi ve devamında da detayı verilen hesaplamalar ile ekserji değişimleri hesaplanmıştır. Bu hesaplamalar sonunda iyileştirme çalışmalarına ihtiyaç duyulan noktalar belirlenmiş ve üzerine yapılabilecek revizyon olasılıkları değerlendirilmiştir. Bu olasılıklardan sürdürülebilirlik açısından en uygun olanı seçilmiş ve yeni bir sistem dizaynı ile bir yatırım planı çıkarılmıştır.

2. MATERYEL VE YÖNTEM

2.1. Enerji ve Ekserji Tanımları

Termodinamik; enerji bilim dalı olup, sistemlerin analiz edilmesini sağlar. Termodinamik tanımlamada söz konusu sistemler, belirli bir kütle ve belirli bir bölgenin incelenmesinin esas alınmasına göre kapalı veya açık olarak nitelendirilir. Kapalı sistem, sınırlarından kütle geçişi olmayan sabit bir bölgedir diğer adıyla kontrol kütlesi olarak da ifade edilir. Enerji, iş veya ısı formunda kapalı sistemin içerdiği sınırlardan geçebilir. Açık sistem ise, sınırlarından kütle geçişi olan sabit bir bölge olup yaygın olarak bilinen adıyla kontrol hacmi olarak anılır. Termik santrallerde yer alan kazan, türbin, pompa ve yoğuşturucu ekipmanlarının her biri kontrol hacmi tanımlaması içerisinde yer alır. Bu makinelerin içindeki akışkanın, enerji taşıyıcı olarak değerlendirilmesi ve termodinamik çözümlerinin yapılmasında makinenin fiziksel sınırları sistem sınırları olarak ele alınır. Açık sistemde, sistem ile çevre arasında kütle girişi ve çıkışı olmakla beraber esas analizlere konu olan kısmı enerji alış verişidir. (Cengel ve Boles, 2007)

Bir akışkanın halini belirleyen en temel iki parametresi basınç ve hacimdir. Bu iki kategoriden birisi veya ikisi tayin edilemeyen akışkan belirsiz bir haldedir. Termal denge tanımlaması, bu belirlenebilirliğin kavramsal bir ifadesi olup, belirli bir miktar akışkanın belirli bir basınca ve belirli bir hacme sahip olduğu hali anlatır. Termal dengenin diğer adı da “Kararlı Hal” dir. Isı değişimi olan yani termal dengeyi bozan etkiler tersinir işlemi ortadan kaldırır. Gerçek bir termal işlemde tersinir süreç, artarda gelen çok sayıda denge durumlarından meydana gelmektedir. Böyle bir sürecin bir başlangıcında ve bir de bitiminde olmak üzere iki denge durumu kabul edilir ki buna göre, tersinir süreç (veya tersinir olduğu kabul edilebilecek süreç), ilk denge ve son denge durumları arasındaki sürecin, birbirini takip eden denge durumlarından oluşması halidir. Bu halde, her bir noktanın basınç ve hacim değeri belirlenebilir ve süreç bir çizgi ile gösterilebilir. Sadece ilk ve son denge durumları için P ve V değeri belirlenebildiği, dengesiz hallerin ardışık olarak birbirini takip ettiği süreçtir. Ancak genel olarak hacmin tam belirlenebilmesi daha mümkündür, bu

durumda basıncın belirsizliği artar. Bu nedenden dolayı tersinmez süreç, P-V diyagramında sürekli olarak değil de, bir belirsizlik alanı olacak şekilde gösterilir. (Hocaoğlu, 2008)

2.1.1. Termodinamiğin Birinci Kanunu

Termik santrallerde termodinamiğin birinci kanunu ile enerjinin dönüşüm miktarları üzerine yorumlar yapılabilir. Enerji, kapalı bir sistemin sınırlarından ısı veya iş olarak geçme özelliğine sahiptir. Kapalı sistemde enerji akışı, sistem ile çevre arasındaki sıcaklık farkından dolayı gerçekleşiyorsa, aktarılan enerji türü, “ısı” enerjisidir. Sıcaklık farkının söz konusu olmadığı durum ise “iş” olarak adlandırılır. Termik santrallerdeki kazanlarda, ısıtıcılarda ve yoğuşturucularda ısı geçişi gerçekleşirken, türbin ve pompalarda iş üretimi (enerji üretimi) ve pompalara verilen enerji ile de akışkanın basınç değerinin artırılması gerçekleşir.

Kazanda dolaştırılan akışkanın kazana giriş şartları ile kazan çıkış şartları arasındaki fark Q birimlik ısı verilmesi gerektirir. Bu durumda akışkanının basınç ve hacmi P_i , V_i 'den P_s , V_s 'ye değişir. Sistemde iş üretimi veya tüketimi de söz konusu ise; Q-W ilk ve son denge durumlarını birleştiren çeşitli yollar boyunca ölçülebilir. Bu durumda termodinamik kanunu, ilk ve son durumu birleştiren bütün yollar boyunca bulunan Q-W değerlerinin eşdeğer olduğunu ifade eder. Q-W niceliği bir sistemin iç enerjisindeki değişmedir.

Genel Enerji Denklemi;

$$E_{giriş} = E_{çıkış} \quad (\text{kW}) \quad (2.1)$$

$$\theta = h + ke + pe \quad (2.2)$$

$$Q - W = m \left[h_{çıkış} - h_{giriş} + \frac{V_{çıkış}^2 - V_{giriş}^2}{2} + g(z_{çıkış} - z_{giriş}) \right] \quad (2.3)$$

$$Q - W = m (\Delta h + \Delta ke + \Delta pe) \quad (2.4)$$

$$\Delta h = h_{çıkış} - h_{giriş} \quad (2.5)$$

$$\Delta ke = \frac{V_{çıkış}^2 - V_{giriş}^2}{2} \quad (2.6)$$

$$\Delta pe = g(z_{çıkış} - z_{giriş}) \quad (2.7)$$

$$Q_{giriş} + W_{giriş} + \sum_{giriş} m \theta = Q_{çıkış} + W_{çıkış} + \sum_{çıkış} m \theta \quad (2.8)$$

şeklinde ifade edilir. Burada Q sisteme eklenen ısıyı ve W sistem üzerine yapılan işi temsil eder. Temelde, çoğu metinde verilen termodinamiğin birinci yasası bağıntısı aynıdır. (Cochran, 2005)

Termik santralin bileşenleri sürekli akışlı, açık sistemlerdir. Sürekli akışlı açık sistemlerde hesaplamalar için yapılan kabuller;

- Kontrol hacmi içinde yaygın özellikler hiçbir zaman değişmez. Böylece kontrol hacmini kütlesi (m), hacmi (v) ve toplam enerjisi (E), sürekli akışlı açık sistemde sabittir. Ayrıca, kontrol hacmine giren toplam kütle ve enerji, kontrol hacminden çıkan toplam kütle ve enerjiye eşit olmak zorundadır.
- Kontrol hacminin sınırlarındaki hiçbir özellik zamanla değişmez. Giriş ve çıkıştaki kütle debisi sabittir. Sistemin çevresiyle birim zamanda yaptığı ısı alışverişi ve birim zamanda yaptığı iş alışverişi sabittir.
- Sürekli akışlı açık sistemde, kontrol hacmi içindeki toplam kütle zamanla değişmez. Bu durumda, kütlenin korunumu ilkesi uyarınca kontrol hacmine giren toplam kütlenin çıkan toplam kütleyle eşit olması gerekir. Sürekli akışlı açık sistemde, kontrol hacminin toplam enerjisinde değişim olmaz. Böylece sürekli akışlı açık sistemde, kontrol hacmine ısı, iş veya kütle akışı olarak giren enerjinin çıkan enerjiye eşit olması zorunludur. (Cengel ve Boles, 2007)

2.1.2. Termodinamiğin 2. Kanunu

Termik santrallerde Termodinamiğin birinci kanunu veya enerjinin korunumu ilkesi hal değişiminin saptanabilmesinde değerlendirilir. Birinci yasa hal değişiminin yönü konusunda herhangi bir kısıtlama koymadığı ve birinci yasanın gerçekleşmesi hal değişimlerinin olacağı anlamına gelmediği bilinir. Hal değişiminin gerçekleşmesi termodinamiğin ikinci yasasıyla tanımlanır. Termodinamiğin ikinci yasası sadece hal değişiminin yönünü belirlemez, enerjinin niceliği yanında niteliği hakkında da fikir yürütmemizi sağlar. Birinci yasa ile enerjinin niceliği, bir biçimden diğer biçime dönüşümü sırasındaki değişimlerin sayısal ifadesi değerlendirilir. Termodinamiğin ikinci yasası ile enerjinin niteliği ve hal değişimi sırasında bu niteliğin nasıl azaldığı hesaplanabilir. (Cengel ve Boles, 2007)

Isıl enerji aktarımının söz konusu olduğu sistemlerde bilinmesi gereken önemli konulardan birisi de entropidir. Entropi'nin ilk tanımı Clausius tarafından;

$$\Delta S = \frac{\Delta Q}{T} \quad (2.9)$$

şeklinde tanımlanmış olup bu tanıma Entropi'nin Clausius Formu denir.

Termodinamik denge hâlindeki bir sistemin belirli bir T sıcaklığında Q değerinde ΔQ gibi bir değişme olduğu takdirde S entropisinde de ΔS gibi bir değişimin olacağı ve sistem entropisindeki değişimin;

$$\Delta S = \int \frac{dQ}{T} \quad (2.10)$$

Şeklinde gerçekleşeceği ifade edilir. Termodinamiğin ikinci kanununa göre bir prosesin tersinir olması için, proses oluşurken sistem ve çevresinin başlangıç şartlarının değişmemesi yani sistemin çevresiyle hiçbir etkileşime girmemesi gerekir. Normalde tersinir bir prosesin oluşması mümkün değildir, gerçekte tüm prosesler tersinmezdir. Tersinmez proseslerin oluşmasına neden olan bütün etkilere (sürtünme, sonlu sıcaklık farkında ısı geçişi, sonlu basınç farkında genleşme, yanma işlemleri, kimyasal reaksiyonlar vs.) “tersinmezlik” adı verilir. Termik santrallerde kullanılan her bir sistemin teorik hesaplamalarının kolaylıkla yapılabilmesi ve sistemlerin performanslarının karşılaştırılması için tersinir olarak değerlendirmeler yapılabilir. Ancak gerçek değerlendirmeler için tersinmez durum değerlendirmesi yapılır. Termik santrallerde kullanılan herhangi bir sistemin entropisinin değişimine neden olabilecek üç etken vardır;

- Sisteme olan ısı geçişi sistemin entropisini artırır, sistemden olan ısı geçişi de sistemin entropisini azaltır.
- Kütlenin enerjisinin yanında entropisi de vardır. Kütle akışı bir kontrol hacmine veya hacminden hem enerji hem de entropi taşınmasına aracı olur.
- Sürtünme, hızlı genişleme, sonlu sıcaklık farkında ısı geçişi vs. her zaman entropinin artmasına neden olur. Bir hal değişimi sırasında entropi üretimi tersinmezliklerden kaynaklanır. Eğer bir hal değişimi sırasında ısı geçişi olmuyorsa veya sistem sınırları içinde tersinmezlik yoksa kütle değişmediği sürece entropi sabit kalır.

Yukarıda verilen bilgilerin ışığında entropi ile ilgili şu sonuçlara varılabilir:

- ✓ Hal değişimleri herhangi bir yönde değil, sadece belirli bir yönde gerçekleşebilir. Bu entropinin artışı ilkesine uygun yöndür, yani bir hal değişimi sırasında toplam $\Delta S \geq 0$ olmak zorundadır. Bu ilkeyi sağlamayan bir hal değişimi gerçekleşemez.

- ✓ Entropinin korunumu söz konusu değildir. Entropi sadece bir düşünce aracı olan tersinir hal değişimleri sırasında sabit kalır, tersinmez (gerçek) tüm hal değişimleri sırasında artar. Bu nedenle çevrenin entropisi sürekli artar.
- ✓ Entropi üretimi bir sistemdeki tersinmezliklerin ölçüsüdür. Tersinmezlikler arttıkça entropi üretimi de artar. (Cengel ve Boles, 2007)

Termik santrallerde kullanılan her bir ünitenin değerlendirmesinde, verilen bu bilgiler ışığında gerçek durum değerlendirmeleri yapılır.

2.2. Ekserji Analizi

2.2.1. Ekserji Tanımı

Çevre sıcaklığında çalışan enerji sistemleri için “kullanılabilir enerji” olarak da bilinen ekserji, enerjinin faydalı kısmı olarak değerlendirilir, yani enerjinin faydalı kısmı, enerjinin başka bir formuna dönüştürülebilen kısmıdır. Bir madde ya da bir enerji akışına bağlı ekserji, baca gazı, soğutma suyu ve ısı kaybı şeklinde çevreye atılır. Hem ekserji tahribi hem de ekserji kaybı, termodinamiğin ikinci kanun analizi de denilen “Ekserji Analizi” ile saptanır. Termodinamiğin ikinci kanunu, hem bir enerji taşıyıcının gerçek termodinamik değerini hem de proses ya da sistemlerden olan kayıpların ve gerçek termodinamik yetersizliklerin hesaplarının yapılabilmesi sonucu ile bir enerji dengesini tamamlar ve geliştirir. Ekserji tahribi direk olarak sistem içindeki tersinmezliklerin sonucudur. (Cengel ve Boles, 2007)

Diğer enerji türlerine dönüştürülmesi olanak dışı olan enerjiye kullanılmaz enerji, bağlı enerji ya da anerji adı verilmektedir. Dolayısıyla, bütün enerji türleri en genel ifade ile aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\text{Enerji} = \text{Ekserji} + \text{Anerji} \quad (2.11)$$

Elektrik ve mekanik enerji gibi enerji türlerinin anerji bölümü sifıra eşittir. Aynı şekilde çevrenin iç enerjisinin tamamı anerji olduğu için çevre enerjisinin ekserjisi de sifıra eşit olmaktadır (Arıkol, 1985)

Karmaşık sistemlerin optimizasyonunda, termodinamiğin ikinci kanunu çok güçlü bir araç olduğunu kanıtlamıştır. İkinci kanunun ışığında mühendislik aygıtlarının performanslarının belirlenebilmesi için; kullanılabilirlik, tersinir iş, tersinmezlik ve ikinci kanun veriminin tanımlamaları ile işe başlanmıştır. Kullanılabilirlik, verilen bir

durumdaki sistemden elde edilebilen maksimum faydalı iş miktarıdır. Tersinir iş ise, belirli iki durum arasında bir proses geçiren sistemden elde edilebilen maksimum faydalı iştir. Ayrıca tersinmezlik, bir proses sırasında kaybedilen iş potansiyelidir ve bu kayıp iş potansiyeli, tersinmezliklerin sonucu olarak meydana gelir.

Kullanılabilirlik çözümlemesinde ilk hal belirli olduğundan dolayı değişken değildir. İki hal arasında sistem tarafından yapılan en çok iş, hal değişiminin tersinir olması durumunda gerçekleşir. Bu nedenle sistemden elde edilebilecek en çok işi belirlerken tersinmezlikler göz önüne alınmaz. Son olarak, sistemden en çok işi elde edebilmek için, hal değişimi sonunda sistemin ölü halde olması gerekir. Bir sistemin ölü halde olması demek, çevresiyle termodinamik dengede bulunması anlamına gelir. Ölü haldeyken sistem, çevre sıcaklığında ve basıncındadır. Başka bir deyişle, çevre ile ısı ve mekanik dengededir. Aksi belirtilmedikçe, ölü hal sıcaklığı 25°C ve basıncı 1 atm alınabilir. Bir sistemin ölü haldeki kullanılabilirliği sıfırdır. Bir sistemden en çok işi elde edebilmek için sistemin son halinin ölü hal olma zorunluluğu şöyle açıklanabilir: Sistemin son haldeki sıcaklığı eğer çevre sıcaklığının üzerinde veya altında ise, çevre sıcaklığıyla bu sıcaklık arasında çalışan bir ısı makinesi aracılığıyla iş yapılabilir. Sistemin son haldeki basıncı eğer çevre basıncının üzerinde veya altında ise bu basınç farkından yararlanarak genişleme işi yapılabilir. (Tekel, 2006)

Bir sistemden elde edilebilecek en çok iş, sistem belirli bir başlangıç halinden, tersinir bir hal değişimi ile çevrenin bulunduğu hale (ölü hal) getirilirse elde edilir. Bu değer, sistemin verilen başlangıç halinde, yararlı iş potansiyelini veya iş yapma olanağını göstermekte ve kullanılabilirlik (ekserji) diye adlandırılmaktadır. Ekserjinin, bir ısı makinesinin gerçek bir uygulamada yapabileceği iş olarak düşünülmemesi gerekir. Bu tanım, bir makinenin termodinamiğin yasalarına ters düşmeden yapabileceği işin üst sınırını belirler. Bir sistemin kullanılabilirliğiyle yaptığı iş arasında küçük veya büyük bir fark her zaman vardır. Verilen bir halde sistemin ekserjisi, sistemin özelliklerinin yanı sıra, çevre koşullarına, başka bir deyişle ölü hale bağlıdır. Çevreyi değiştirmek kullanılabilirliği artırmanın bir yolu olabilir, fakat kolay bir yol olmadığı açıktır. Ekserji sadece faydalı enerji düşüncesinden oluşmayan, aynı zamanda çevreyi kirleten enerji kaynaklarının tüketiminin azaltılması ve yeni çevre dostu enerji kaynaklarının kullanıma sunulması gibi konuları da kapsayan çok önemli bir mühendislik yaklaşımıdır. (Cengel ve Boles, 2007)

Ekserji, referans çevreye göre tamamen kararlı dengede olmamanın sonucu olarak değişime neden olan akış ya da sistemin potansiyelinin bir ölçüsüdür. Enerjiden farklı olarak ekserji, ideal veya tersinir prosesler hariç olmak üzere korunum yasasına uğramaz. Ekserji daha çok gerçek proseslerdeki tersinmezlikler nedeniyle ortaya çıkan entropi ile orantılıdır. Enerji ve ekserji kavramları Çizelge 2.1.de açık olarak kıyaslanmaktadır (Dincer ve Al-Muslim, 2002)

Çizelge 2.1: Enerji ve ekserji kavramlarının karşılaştırılması
(Wall ve Gong, 2001)

ENERJİ	EKSERJİ
1.Korunum yasasına bağlıdır.	1.Korunum yasasından muaftır.
2.İncelenmekte olan maddenin bir hal fonksiyonudur.	2.İncelenmekte olan maddenin ve bulunduğu çevrenin hal fonksiyonudur.
3.Herhangi bir referans haline göre varsayım yapıp hesaplama yapılabilir.	3.Referans hali değişebilen çevreden etkilenir.
4. Sıcaklığın yükselmesiyle artar.	4.Çevresinden daha düşük sıcaklıklarda sıcaklık düşüşleriyle artar.
5.İdeal gaz durumunda basınca bağlı değildir.	5.Daima basınca bağlıdır.
6.İdeal vakum için sıfıra eşittir.	6.İdeal vakum için pozitifdir.

Enerji ile ekserji kıyaslandıktan sonra ekserji analizi yapmanın önemini aşağıdaki şekilde sıralayabiliriz;

- Enerji kaynaklarını kullanımının çevreye olan etkilerinin en iyi şekilde belirlenmesinde bir araçtır.
- Enerji sistemlerinin tasarımı ve analizi için termodinamiğin ikinci yasasıyla birlikte kütle ve enerjinin korunumu prensiplerini kullanan etkin bir yöntemdir.
- Daha fazla verimli kaynak kullanma amacını destekleyen uygun bir tekniktir. Belirlenmesi gereken atık ve kayıpların yerleri, tipleri ve gerçek büyüklükleri ortaya çıkarılır.

- Mevcut sistemlerdeki verimsizlikleri azaltarak, daha verimli enerji sistemlerini tasarlamının nasıl mümkün olup olmayacağını gösteren etkin bir tekniktir.
- Sürdürülebilir gelişmenin elde edilmesinde anahtar bir bileşendir.
- Enerji politikalarının oluşturulmasında kullanılacak önemli bir araçtır. (Hepbaşlı, 2008)

2.2.2. Ekserji Çeşitleri ve Denklemleri

Ekserji kelimesi Yunanca ex (dış) ve ergon (kuvvet ve iş) kelimelerinden türetilmiştir ve enerjinin başka bir enerjiye tamamen dönüşen kısmına denir. Başka bir deyişle ekserji, tamamen başka bir enerjiye dönüşen enerji oranını göstermektedir. Daha sonraları ekserji, verilen şartlardaki bir sistemin çevresi ile aynı şartlara getirilmesi (ölü hal) sonucu elde edilebilecek maksimum iş potansiyeli şeklinde tanımlanmıştır (Rivero ve Anaya, 1997)

Termodinamiğin birinci kanununa göre enerji, yoktan var edilemez, diğer bir deyişle yaratılamaz veya vardan yok edilemez. Ancak bir biçimden başka bir biçime dönüştürülebilir. İkinci kanun ise, enerjinin niceliğinin yanında niteliğinin de önemliliğini vurgulamakta ve hal değişimlerinin sistemlerin enerji niteliğini azaltan yönde gerçekleştiğini belirtmektedir.

I. Kanun; bütün termodinamik süreçlerde enerji ve ekserjinin toplamı sabit kalır, II. Kanun ise; tersinir süreçlerde ekserji sabit kalır, yani tersinmez süreçlerde ekserjinin bir kısmı veya tamamı enerjiye dönüşür veya enerji ekserjiye dönüşmez şeklinde ifade edilebilir. (Cengel ve Boles, 2007)

Ekserji analize başlamadan önce en temel tanım olan Ölü Hali'ni açıklamak gerekecektir. Bir sistem ile çevresi arasında basınç, sıcaklık, kompozisyon, hız ya da yükseklik farkı var ise bu durumda iş alma potansiyeli var demektir. Sistem çevre şartlarına eşit olduğunda ise bu potansiyel kaybolur. Bundan dolayı çevre, diğer sistemlerin iş potansiyellerini değerlendirmek için bir referanstır, sistem ile çevresi arasında denge bulunduğu duruma ölü durum adı verilir. Ölü durumda sistem ile çevre arasında mekanik, termik, kimyasal denge olduğundan sistemin basıncı, sıcaklığı, kimyasal kompozisyonu çevrenin değerlerine eşittir

Bir sistemin ölü halde olması, çevresiyle termodinamik dengede bulunması anlamına gelmektedir. Termodinamik denge, bir sistemin verilen bir zamanda her noktasındaki

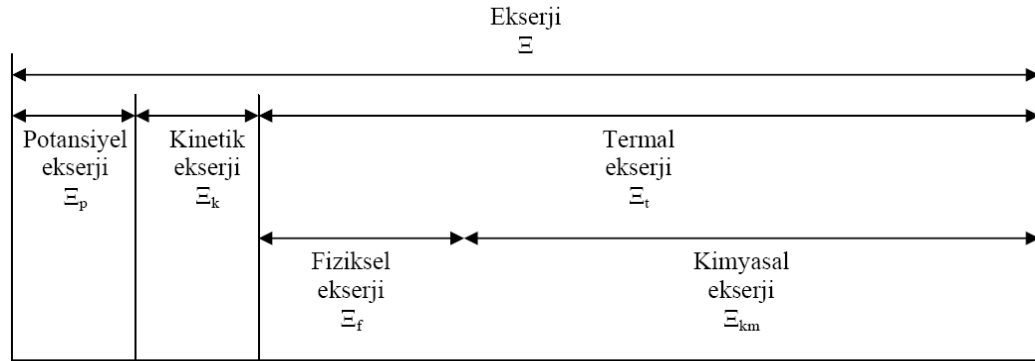
hali aynı ise veya özelliklerin farkı sonsuz küçük mertebede ise oluşmaktadır. Başka bir ifadeyle, sistem ayrık bir sistem haline getirildiğinde özellikleri değişmiyorsa, bu sistem için denge söz konusu olmaktadır. Termodinamik dengede tüm kısıtların sağlanması gerekmektedir. Bunlar ısı, mekanik, kimyasal ve faz dengeleridir. Sistem ölü halde iken, sistem çevre ile aynı sıcaklığa ve basınca sahip olup çevre ile termodinamik kısıtların sağlandığı denge halindedir. (Kotas, 1985).

Nükleer, manyetik, elektrik ve yüzey gerilim etkileri göz ardı edildiğinde, bir sistemin toplam ekserjisi dört bileşenden oluşur;

- Kinetik ekserji, Ex_{kin}
- Potansiyel ekserji, Ex_{pot}
- Fiziksel ekserji, Ex_f
- Kimyasal ekserji, Ex_k

Bu ifadeler ışığında ekserji Ex için şöyle bir matematiksel denklem yazılabilir;

$$Ex = Ex_{kin} + Ex_{pot} + Ex_f + Ex_k \quad (2.12)$$



Şekil 3.1: Değişmez sistem sınırından geçen madde akımının ekserji bileşenleri
(Szargut, Morris ve Steward, 1998)

Kinetik Ekserji

Kinetik enerji, mekanik enerjinin bir şeklidir ve tamamen işe dönüşebilir. Bu nedenle bir sistemin kinetik enerjisinin ekserjisi veya is potansiyeli çevrenin sıcaklık ve basıncına bağımsız olarak kendi kinetik enerjisine eşittir:

$$Ex_{kin}: \frac{1}{2} v^2 \quad (2.13)$$

Burada, v çevre koordinatlarına göre hızı belirtmektedir.

Potansiyel Ekserji

Potansiyel enerji mekanik enerjinin bir şeklidir ve dolayısıyla işe tamamen dönüşebilir. Böylece bir sistemin potansiyel enerjisinin ekserjisi, çevrenin sıcaklık ve basıncına bağlı olmaksızın kendi potansiyel enerjisine eşittir; (Çengel ve Boles, 1998)

$$E_{x_{pot}} = gh \quad (2.14)$$

Burada, h, çevre koordinatlarına yüksekliği belirtmektedir.

Çalışmamızda çevre koordinatlarına göre bir değişim söz konusu olmadığı için potansiyel ve kinetik ekserji değişimi “0” kabul edildiği için incelenmeyecektir.

Fiziksel Ekserji

Fiziksel ekserji; akış halindeki bir maddenin çevresi ile sadece termal etkileşimi neticesinde tersinir hal değişimi ile mevcut sıcaklık ve basınç şartlarından (T, P), çevre şartları (P_o, T_o) ile termodinamik dengeye getirildiğinde sistemden elde edilebilecek maksimum iş olarak tanımlanır (Kotas, 1995).

Belirli bir durumdaki kapalı bir sistemin fiziksel ekserjisi aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$E_{x_f} = (U - U_0) + p_0(V - V_0) - T_0(S - S_0) \quad (2.15)$$

Açık bir sistemdeki akışın fiziksel ekserji de aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$E_{x_f} = (H - H_0) - T_0(S - S_0) \quad (2.16)$$

Kimyasal Ekserji

Kimyasal ekserji, sistem kısıtlı ölü halden, çevre ile tam dengede olduğu ölü hale geçerken elde edilebilen maksimum teorik yararlı iştir. Uygun bazı çevre malzemelerinin özellikleri referans alınarak maddelerin standart kimyasal ekserjileri hesaplanmıştır. Standart kimyasal ekserjiler standart çevre sıcaklığına (T_o= 25°C) ve basıncına (P_o = 1 atm) bağlıdır. (Kotas, 1995).

Çevre gaz fazında bulunan bir gazın standart kimyasal ekserjisi şöyle hesaplanır: k gazı T_o ve P_o'da girer, çevre ile ısı aktarımı gösteren sistemde izotermal olarak genişler ve T_o olarak sistemden çıkar. (Bejan, Tsatsaronis, Moran, 1996)

Çevrede gaz fazda bulunan n gazlı bir karışımın kimyasal ekserjisi benzer şekilde elde edilebilir. Karışımın mol başına kimyasal ekserjisi aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$E_{x_k} = -RT_0 \ln (x_k^e P_1 / P_0) \quad (2.17)$$

$$= -RT_0 \ln x_k^e$$

$$E_{x_k} = -RT_0 \sum x_k \ln \frac{x_k^e}{x_k}$$

$$= \sum x_k E_{x_k} + RT_0 \sum x_k \ln x_k \quad (2.18)$$

Ekserji Dengesi

Kapalı bir sistem için ekserji dengesi için enerji ve entropi dengelerinin birleşimiyle aşağıdaki eşitlik geliştirilir:

$$(U_2 - U_1) + (KE_2 - KE_1) + (PE_2 - PE_1) = \int_1^2 Q - W \quad (2.19)$$

2.3. Ekonomik Analiz

İyileştirme sistemleri dizayn edilen tüm çalışmalarda olduğu gibi bu çalışmada da teknik analizlerin ardından ekonomik analiz yapılması şarttır. Sistemdeki termodinamik analizin yapılması ve enerjinin kazanılacağı kısımların belirlenmesi uygulanabilirlik açısından tek başına yeterli olmayacaktır. Yapılan çalışmanın günümüz endüstri dünyasına da hizmet etmesi için mutlaka ekonomik olarak da analizinin yapılması şarttır. Termodinamik çalışmalarda, tamamlanan teknik analizler ardından yapılan ekonomik analizlere termoekonomik analiz adı verilmektedir.

Termoekonomi; ekserji analizlerinin ekonomik prensipler ile birleştirilmesiyle geleneksel termodinamik analiz veya ekonomik değerlendirme metotları ile elde edilmesi güç olan ve işletilmesi için gerekli ve önemli bilgiler sağlayan termal bilimlerin önemli bir dalıdır. (Mert, 2010)

Termoekonomi, maliyet etkin bir sistem tasarımında ve işletilmesinde sıradan enerji veya ekserji analizi ve ekonomik analiz ile elde edilemeyen bilgilerin sağlandığı, sistem birimleri seviyesinde ve termodinamik değerlendirmeler temelinde ekserji analizi ile ekonomik prensiplerin birleştirildiği mühendislik dalıdır. Ayrıca, enerji dönüşüm sisteminin çevresindeki ve içerisindeki termodinamik verimsizliklerin parasal maliyetler ile ilişkilendirilebildiği tek rasyonel temel olan ekserji kavramına dayanmaktadır. (Tsatsaronis, 1999)

Termoekonomi, modele bağlı olarak ekserji analizi temelinde yapılır. Ekserji analizi tamamlandıktan sonra, bir sonraki adım olan maliyetlerin hesabına geçilir. Sisteme

giren ve sistemden çıkan madde veya enerji akımlarıyla ısı ve iş yoluyla meydana gelen ekserji değerleri maliyet akımına dönüştürülür. (Bejan, 1996)

Bir santralin maliyetleri; yatırım masrafları, yakıt masrafları ve işletme-bakım giderleri olarak üç ana başlıkta toplanabilir. Referans olarak aldığımız santral, hali hazırda uzun zamandır işletmede olan ve bu aşamadan sonra büyük dizayn değişikliklerine bağlı üretim kayıplarına imkan veremeyecek bir işletmedir. Bu yüzden üzerinde çalışılacak noktalar sınırlı olup maliyete etki eden 3 parametre açısından ayrı ayrı düşünülerek analiz edilmelidir. Öncelikle yapılacak revizyonun yatırım maliyeti mümkün olan en düşük seviyede olmalıdır. İkincil olarak ise; iyileştirme sonucu verimi en yüksek oranda arttırmalıdır ki bu da yakıt tüketiminin azalması anlamına gelmektedir. En büyük sürekli maliyet kalemi olan yakıt maliyetinin azaltılması enerji santralının devrede olduğu sürece finansal kazanç sağlaması anlamına gelmektedir. Son olarak ise yapılan dizayn değişikliği hem santral işletmecileri hem de bakımçıların çalışma şekillerine uygun olmalı ve bu departmanlara ek bir maliyet getirmemelidir. Eğer kullanılacak sistemde yeni bir sarf malzeme kalemi var ise mutlaka ekonomik analiz içerisinde değerlendirilmelidir.

Yatırım maliyeti ise incelenirken öngörülen bütçenin gelecekteki değeri ve ilk yatırımın geri kazanım faktörü gibi hesaplar üzerinden çalışma yapılması gerekmektedir.

Paranın Zaman Değeri

Şimdiki zamanda sahip olunan belirli miktardaki para, bir süre sonra sahip olunacak aynı miktardaki paradan daha çok değerlidir. Çünkü bugünkü para yatırıma dönüştürülebilmekte ve enflasyona maruz kalmamaktadır. Bu nedenle belirli bir proje çerçevesinde, paranın zaman içinde yapacağı veya yapmış olduğu hareketler önem kazanmaktadır.

Paranın Gelecekteki Değeri

P miktardaki bir para, n dönem için, i “bileşik faiz oranı” ile bir hesaba yatırıldığında, içerisinde p defa yapılmak yerine bir yılsonunda bir defa yapıldığı yıllık faiz oranına "efektif faiz oranı" denir. Nominal faiz oranından daha yüksek olan efektif faiz oranı, yatırılan paranın n dönem sonra gelecekteki F değeri;

$$F = P(1 + i)^n \quad (2.20)$$

eşitliği ile hesaplanabilir (Bejan, 1996).

Birleşik Faiz Frekansı

Mühendislik sistemlerinin ekonomik analizlerinde dönem süresi olarak genellikle yıl kullanılır. Eğer bileşik faiz bir yıl içerisinde p defa gerçekleşiyor ise, P miktardaki bir paranın n yıl sonra gelecekteki F değeri;

$$F = P \left(1 + \frac{i}{p}\right)^{np} \quad (2.21)$$

şeklinde hesaplanır. Bu denklemdeki np toplam dönem sayısını ve i/p ise dönem başına faiz oranını göstermektedir. Bu eşitlikteki i terimi "nominal faiz oranı"dır. Bileşik faizin bir yıl içerisinde p defa yapılmak yerine bir yılsonunda bir defa yapıldığı yıllık faiz oranına "efektif faiz oranı" denir.

Paranın Bugünkü Değeri ve Bugünkü Değer Faktörü

Ekonomik analizlerde, gelecek zaman içinde belirli dönemlerde yapılacak olan harcamalar ve kazanılacak olan gelirlerin şimdiki değerlerinin bilinmesine sıklıkla gereksinim duyulur.

Gelecekteki belli bir F miktar paranın belirli bir faiz oranıyla ulaşılabilecek P bugünkü değeri aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$P = F \frac{1}{(1+i_{\text{eff}})^n} \quad (2.22)$$

İlk Yatırım Maliyeti Geri Kazanım Faktörü (CRF)

Bir yıllık ödemenin bugünkü değeri (A); belli bir dönem sonundaki yıllık ödeme toplamının, yıllık ödeme başlangıcında efektif faiz oranıyla yatırılmış olması durumundaki değeri olarak ifade edilir ve aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$CRF = \frac{A}{P} = \frac{i_{\text{eff}}(1+i_{\text{eff}})^n}{(1+i_{\text{eff}})^{n-1}} \quad (2.23)$$

Geri ödeme süresinin hesaplanması ardından kurulacak yeni sistemin kullanım ömrü, sağlayacağı avantajlar ve varsa dezavantajların da belirtildiği bir final rapor ile yatırımın nihai kararı alınmalıdır.

3. ÖRNEK SANTRAL ANALİZİ

3.1. Termik Santralin Tanıtımı

Üzerinde değerlendirmeler yapılan Termik Santral 100 MW elektrik enerjisi üretim kapasitesine sahip kömür santralidir. Söz konusu tesiste kullanılan buhar kazanı 400t/h buhar kapasitesine sahiptir. Buhar çıkış şartları 510°C sıcaklıkta ve 84 bar basınçta. Doğal gaz ve kömür ile çalışabilecek bir yakma sistemine sahiptir. Kazan devreye alınmaya başlanırken yakıt olarak doğal gaz ile başlanır, işletme şartları rejime girdikten sonra çıkış basıncı sabit tutulacak şekilde kömür beslemesi yapılmaktadır. Elevatörden çıkarak bunkerlere gelen kömür, buradan kömür besleyicilere ulaşır. Bunkerler kömürün stoklanmasını, kömür besleyicileri ise kömürün sisteme sabit bir akış ile verilmesini sağlar. Her bir kömür besleyici o setteki değirmeni besler. PA Fan yani birincil hava fanı ile içerisine verilen hava ile öğütülmüş kömürü brülörlere ulaşır. Yanmanın istenen şekilde oluşabilmesi için ikincil hava verilerek alev şekli ve boyu ayarlanır. Yanma odasında oluşan alev topu sonucunda kazanın buharlaştırıcı borularındaki su, buhar fazına geçer, drum ya da dom adı verilen bir kollektöre giden buhar ve su karışımı burada fazlarına göre ayrılır. Buhar fazı ilk önce kazan kızdırıcı bölgesine buradan buhar kollektörüne giderek son olarak buhar türbinine beslenir.

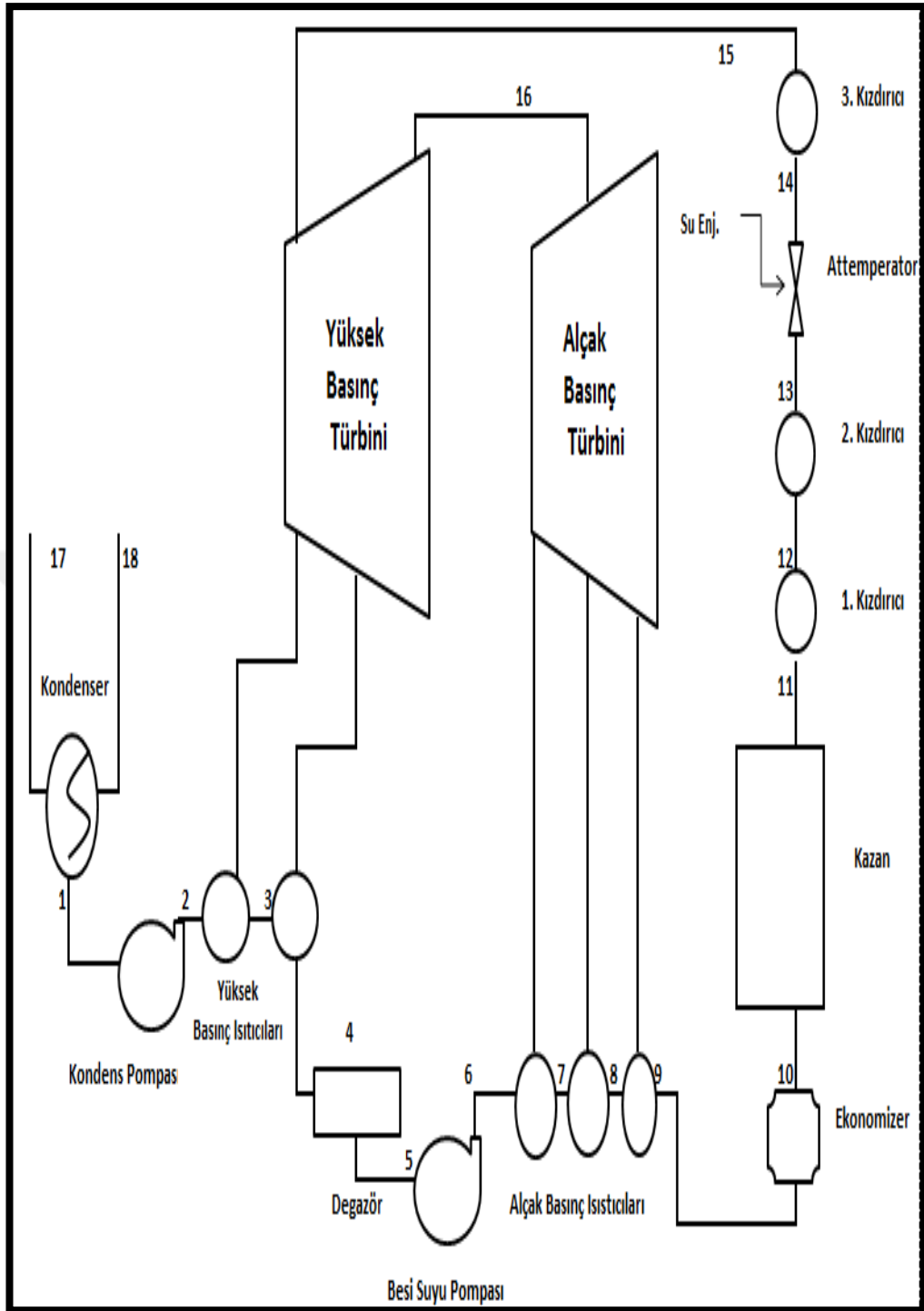
510°C ve 84 bar şartlarına gelmiş kızgın buhar türbinin girişinde reglaj ya da diğer bir ismi ile kademe kontrol vanalarına ulaşır. Bu vanalar ihtiyaç duyulan enerji oranında açılır ve türbine akışı sağlar. İlk olarak yüksek basınç türbinine giren buhar bir dizi kademedan geçerek üzerindeki enerjiyi rotora hareket enerjisi olarak aktararak alçak basınç türbinine gider. Alçak basınç türbininde de enerjisini bıraktıktan sonra çürük buhar olarak kondensere girer ve yoğuşarak su çevrimine yeniden başlar. Bu şekilde kapalı devre bir döngü devam eder. Yanma sonucu oluşan cüruf kazan altındaki cüruf teknesinden alınır. Kazandan çıkan yanmış gaz ise 3 adet gaz temizleme ünitesinden geçtikten sonra tüm emisyon kuralları dahilinde yanmış gaz ise bacadan atılır.

3.2. Santral Çevrimi ve İnceleme Metodu

Bu çalışmada santralin su-buhar çevrimi ekipman bazında detaylı olarak işlenmiştir. Şekil 4.1’de de görüleceği üzere her ekipmanın giriş ve çıkış noktalarında akışkan değerleri dikkate alınarak düğüm noktaları belirlenmiştir. Santral üzerinde toplamda 18 adet düğüm noktası olmuştur. Tanımlanan düğüm noktalarının belirlenmesinde kullanılan ekipmanlar sırası ile şöyledir;

1. Kondensat pompası
2. Drenaj eşanjörü
3. Alçak basınç ısıtıcısı 1
4. Alçak basınç ısıtıcısı 2
5. Degazör
6. Besi suyu pompası
7. Yüksek basınç ısıtıcısı 1
8. Yüksek basınç ısıtıcısı 2
9. Yüksek basınç ısıtıcısı 3
10. Ekonomizer
11. Kazan
12. 1. kademe kızdırıcısı
13. 2. kademe kızdırıcısı
14. Attemperator
15. 3. kademe kızdırıcısı
16. Yüksek basınç türbini
17. Alçak basınç türbini
18. Kondenser

Bu ekipmanların ise birer ısı alış verişi düğüm noktasını olduğunu düşünülürken her biri için en az bir giren akışkan ve yine en az bir çıkan akışkan olduğu görülebilir. Çizelge 3.1’de ise bu akışkanların; debi, basınç, sıcaklık, entalpi gibi özellikleri listelenmiştir.



Şekil 3.1: Santral genel akış şeması

Çizelge 3.1: Düğüm noktalarından alınan ölçümler

Şema No	Düğüm noktası	Basınç (bara)	Sıcaklık (°C)	Entalpi (kJ/kg)	Entropi (kJ/kgK)
1	Kondens pompası çıkışı	12	40	167,4	0,6
2	AB Isıtıcısı 1 girişi	12	44	184,1	0,6
3	AB Isıtıcısı 1 çıkışı	12	73	305,4	1
4	AB Isıtıcısı 2 çıkışı	12	98	410,4	1,3
5	Degazör çıkışı	2	123	516,3	1,6
6	Besi suyu pompası çıkışı	120	123	524,2	1,6
7	YB Isıtıcısı 1 çıkışı	117	150	631,9	1,8
8	YB Isıtıcısı 2 çıkışı	114	174	736,4	2,1
9	YB Isıtıcısı 3 çıkışı	110	198	842,9	2,3
10	Ekonomizer çıkışı	95	277	1220,8	3
11	Yanma odası çıkışı	84	298	2753,3	5,7
12	1 . Kızdırıcı çıkışı	84	360	3007	6,2
13	2. kızdırıcı çıkışı	84	431	3216,6	6,5
14	Enjeksiyon sonrası	84	418	3181,5	6,4
15	3. kızdırıcı çıkışı	84	510	3417,7	6,7
16	YB Türbinden AB türbine	2,5	129	2720,1	7,1
17	Kondenser girişi	0,064	26	109	0,4
18	Kondenser çıkışı	0,064	37	154,9	0,5

Bu parametrelere termodinamik çizelgelerden entalpi ve entropi değerleri de eklenmiştir. Daha sonrasında debi ile doğru olarak her bir noktadaki enerji ve ekserji değerleri hesaplanarak çizelgeye işlenmiştir. Ekserji hesaplamalarında 2.12...2.19 formüllerinden yararlanılarak toplam ekserji içerisindeki fiziksel ve kimyasal enerji de ayrıca hesaplanarak Çizelge 3.2’de gösterilmiştir.

3.3. Düğüm Noktaları Hesaplamaları

Çalışmanın devamında yapılacak hesaplamalarda

$$E_X = E_{X_{kin}} + E_{X_{pot}} + E_{X_f} + E_{X_k} \quad (3.1)$$

$$E_{X_f} = (H - H_0) - T_0 (S - S_0) \quad (3.2)$$

$$E_{X_k} = - RT_0 \ln (x_k^e P_0 / P_0) \quad (3.3)$$

Sistemden en çok işi elde edebilmek için, hal değişimi sonunda sistemin ölü halde olması gerekir. Ölü haldeyken sistem, çevre sıcaklığında ve basıncındadır. Başka bir deyişle, çevre ile ısı ve mekanik dengededir. Aksi belirtilmedikçe, ölü hal sıcaklığı 25° C ve basıncı 1 bar alınabilir. Bir sistemin ölü haldeki kullanılabilirliği sıfırdır. Çalışma boyunca kullanılan ölü hal parametreleri aşağıdaki gibidir;

- T_0 :298 K
- h_0 : 104,71 kJ/kg
- P_0 : 0,01 bar
- S_0 : 0,3667 kJ/kgK olarak kullanılmıştır.

Çizelge 3.2'deki ekserji hesaplamalarındaki su çevriminde kondens miktarı 280 t/h'dir, degazöre girmeden önce suyun içerisindeki çözünmüş gazların alınması için verilen 25 t/h buhar ile birlikte Ekonomizer vasıtasıyla kazan giren su miktarı 305 t/h'e ulaşmaktadır. Kazan çıkışındaki 2. Kızdırıcı çıkışında ortalama 15 t/h su enjeksiyonu yapılarak kızgın buhar sıcaklığı kontrol altında tutulmaktadır ve bu proses sonucu kazan kızdırıcı çıkışı akış miktarı 320 t/h'e ulaşmaktadır. 1. Ve 2. Sütundaki ekserji hesaplamaları bu debilerin kullanılmasıyla bulunmuştur ve son sütunda ise "kW" cinsine çevrilmiştir. Ayrıca bu çalışmada Kinetik Ekserji ve Potansiyel Ekserji ihmal edildiği için hesaplamalara katılmamıştır.

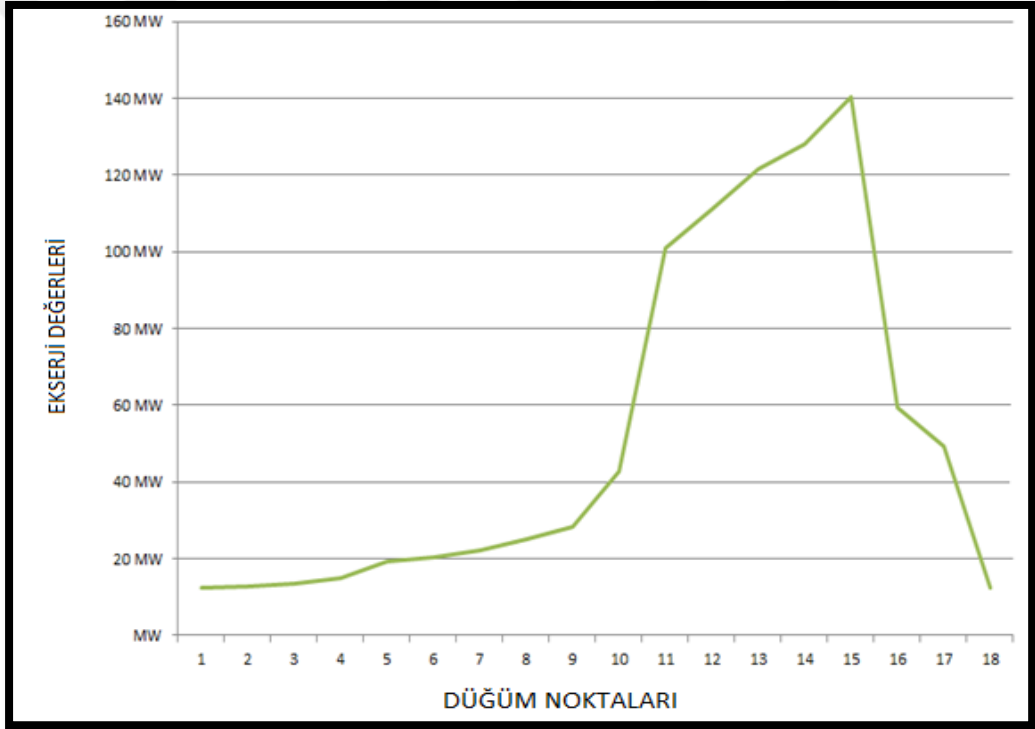
Bu çalışmanın çıktısına hizmet edecek hesaplamalarda asıl amaç; ölü halden uzak olan bir proses koşulunu, yapılacak bir iyileştirme ile ölü hale yaklaştırmaktır. Sistemde kullanılmayan ya da kaybedilen bir enerji kaynağının başka bir proses ile entegrasyonu sonucu enerjisinin kullanılması yani ölü hale yaklaştırılması amaçlanmıştır. Bunun için ise referans çizelge üzerinden hangi düğüm noktası ve hangi proses noktalarının kullanılacağı detaylıca incelenmiştir.

Çizelge 3.2: Dügüm noktalarından hesaplanan enerji ve ekserji değerleri

Şema No	Türü	Fiziksel Ekserji (kj/kg)	Kimyasal Ekserji (kj/kg)	Toplam Ekserji (kW)
1	Kondens pompası çıkışı	1,5	160,1	12570,5
2	AB Isıtıcısı 1 girişi	2,4	160,1	12640,2
3	AB Isıtıcısı 1 çıkışı	14,6	160,1	13588,5
4	AB Isıtıcısı 2 çıkışı	32,4	160,1	14973,4
5	Degazör çıkışı	56,2	160,1	19225,4
6	Besi suyu pompası çıkışı	67,5	160,1	20233,1
7	YB Isıtıcısı 1 çıkışı	87,9	160,1	22043,5
8	YB Isıtıcısı 2 çıkışı	121,0	160,1	24987,3
9	YB Isıtıcısı 3 çıkışı	158,7	160,1	28341,3
10	Ekonomizer çıkışı	319,5	160,1	42629,9
11	Yanma odası çıkışı	1052,3	160,1	101036,1
12	1 . Kızdırıcı çıkışı	1176,6	160,1	11395,2
13	2. kızdırıcı çıkışı	1300,0	160,1	121675,1
14	Enjeksiyon sonrası	1280,1	160,1	128023,0
15	3. kızdırıcı çıkışı	1418,5	160,1	140319,6
16	YB Türbinden AB türbine	620,6	160,1	59421,3
17	Kondenser girişi	509,8	160,1	49104,7
18	Kondenser çıkışı	1,0	160,1	12530,0

4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

İyileştirme öncesinde; 140 MW ısı gücünden 75 MW elektrik enerjisi elde edilmiş ve 15 MW gücüne denk bir ara buhar çekişi gerçekleştiği belirlenmiştir. Diğer yandan kondenser çıkışında da yaklaşık 10 MW değerinde bir enerji bulunduğu için sistemdeki kayıp 40 MW olarak hesaplanmıştır. Çizelge 3.2’de belirtilen ekserji analizleri çıktılarından yapılan değerlendirmelerdeki toplam ekserji değerleri Şekil 4.1’de gösterilmiştir.



Şekil 4.1: Düğüm noktalarında elde edilen ekserji değerleri

Ekserji analizi incelendiğinde büyük kaybın türbinin ara kademelerinde gerçekleştiği görülmüştür. Bu proses esas olarak, besi suyunun türbinden çekilen buhar ile ısıtılmasıdır. Kazan besi suyu içerisinde bulunan O_2 ve CO_2 gibi gazların kazan içerisine girmesi istenmeyen bir durumdur. Basınçlanarak kazana giren besi suyu içerisinde bulunan çözünmemiş bu gazlar kazan borularında korozyona ve buna kazan boru patlaklarına sebep olacaktır bu yüzden besi suyunun kazana en az $110\text{ }^\circ\text{C}$ olarak giriş yapması şarttır.

İncelenmesi gereken durum; ısıtılması gereken besi suyunun türbinden daha az buhar çekilmesi ile yapılmasıdır. Türbine farklı bir ara kademe eklemek ile ya da ara kademe buharını arttırmak ile besi suyu buharı sıcaklığını arttırarak enerjisi yükseltebilir. Fakat sistemin genel verimi olumsuz olarak etkilenecektir aynı zamanda bu şekilde sistemin de kayıp enerjinin artması anlamına gelir.

Bunun yerine ısıtıcılara ilk giren şartlandırılmış suyu farklı bir enerji, kaynağı ısıtmak suretiyle hem besi suyu daha fazla ısıtılır hem de türbinden alınan ara çekiş buharı da düşürülmüş olur. Besi suyunu ön ısıtmanın farklı yolları vardır; türbin drenajları, kazan dam blöfleri, ısıtma hatları drenajları, türbin vakum hatları, kurum üfleme drenajları gibi yüksek enerji kapasiteli proses sonu buharlarını kullanmak en çok başvurulan yöntemlerdir. İyileştirme yapılacak noktanın sadece devreye almada ortaya çıkması ya da nadir periyotlarda olması tercih edilmez. Verimi arttırıcı çalışmanın daha olumlu bir sonuç çıkarması için sürekli kaynakların kullanılması uygundur. Bu yüzden bu çalışmada dram daimi blöflerinin enerjisinin kullanılması tercih edilmiştir.

4.1. İyileştirme Prosesi Dizaynı

Kazan dramları, kazanlardaki ısınan suyun, hem su hem de buhar fazında bulunduğu ve tam olarak bu iki fazın birbirinden ayrıldığı ekipmanlardır. Dram içerisindeki sürekli akış sırasında su içerisindeki istenmeyen safsızlıklar bu ekipmanların dip kısmından sürekli bir şekilde atılır. Planlanan revizyonun detay akış şeması ise Şekil 4.2’de , yeni sistemin mevcut sisteme entegre edilmiş akış şeması ise Şekil 4.3’te gösterilmiştir.

Tesiste bulunan her iki kazan için de kullanılabilir olabilecek bu sistem ilk olarak bu çalışmada incelenen 300 t/h buhar kapasiteli kazan için ele alınmıştır. Kazan dramından alınan ısı kaynağının sağladığı enerji tasarrufu 3 farklı yolla incelenmiştir;

1. Tasarruf noktası; tanka alınarak genişliğinde flaş buhara dönüşen kısmın kullanılmasıdır. Normal şartlarda türbinden çekilen ara buharı bir basınç kontrol vanası ile 1 bara düşürülerek degazörde kullanılmaktadır. Besi suyu içerisindeki gazların çözünmesi için kullanılan bu buharın bir kısmının yerine flaş buhar kullanılması ile ara çekiş buharı azalacak ve dolayısıyla ekserji kaybına sebep olan en büyük verimsizliğin bir bölümünün önüne geçilecektir.

2. Tasarruf noktası; daimi blöflerin flaş buhar olduktan sonra geride kalan ve bir miktar safsızlık içerdiği için tekrar sistemde kullanılamayacak olan kondensin enerjisinin bir eşanjörde kullanılması planlanmıştır. Bu sistemde; kullanılacak gövde-boru tipli bir eşanjördeki boruların içerisinden kazan besi suyu takviyesi geçerken, tüplerin dışından ise enerjisi vermek üzere toplanan daimi blöflerin kondens olan kısmı geçmektedir. Oluşacak ısı transferi sonucu kazana beslenecek takviye şartlandırılmış su ısıtılmış olup yine bu suyun ısıtılması için sistemden alınacak enerjinin bir kısmı kazanılmış olur.

3. Tasarruf noktası ise; enerji kaynağı olmamakla birlikte direkt olarak sistemden atılan suyun azalmasıyla kazanılan su şartlandırma ünitesinde gerçekleşir. Kazanın ihtiyacı olan kazan besi suyunun bir kısmının atılmaması ya da sistemi geri kazanılması ile en temel doğa kaynağı olan suyun tüketimini azaltırken maliyetli bir proses olan su şartlandırma sisteminin üretim ve dolayısıyla toplam maliyeti azalması anlamına gelmektedir.

4.2. İyileştirme Prosesinin Termodinamik İncelenmesi

Yeni yapılan dizayna göre gerçekleşmesi beklenen enerji kazanımlarının termodinamik hesapları ise yine bu kazanç metotlarına paralel olarak üç başlık altında incelenebilir;

1. Kazan besi suyu içerisindeki safsızlıkların atılması için deşarj edilen suyun miktarı ortalama 2,5 ton/h olarak ölçülmüştür. Bu suyun flaş buhar tankına alınması ile toplam miktarın yaklaşık % 40 kadarına denk gelen 1 t/h flaş buhar elde edilmesi ve degazöre beslenmesi planlanmıştır. Şekil 4.2'de de gösterildiği üzere degazöre

yeni çekilen 4a ile 4b numaraları ile belirtilen buhar hatları (bu çalışmada sadece 4a kullanılmıştır) sayesinde eski sisteme göre buhar tüketimi düşmesi beklenmektedir. Normal şartlarda degazöre beslenen buharın azalması ile ilk enerji tasarrufu gerçekleşecektir. Bu çalışmadaki buhar türbinin proste kullanılan ara buharı 6 bar 175 °C olup buhar entalpisi 2787.4 kJ/kg'dir.

Yeni tasarlanan sistemin sağlayacağı tasarruf şu şekilde olacaktır;

$$W = m (\Delta h + \Delta ke + \Delta pe)$$

$$\Delta h = h_{\text{çıkış}} - h_{\text{giriş}}$$

$$W = 0 \text{ olacağından}$$

$$\Delta Q = m \Delta h \text{ olacaktır}$$

$$\Delta Q = 1000 \text{ kg/h} \times 2787,4 \text{ kJ/kg} = 774,2 \text{ kW} \quad \text{kazanç sağlanacaktır.}$$

2. Diğer bir kazanç ise 2a ve 2b numaralı (bu çalışmada sadece 2a kullanılmıştır) düğüm noktaları arasına konan yeni eşanjör sisteminden sağlanmaktadır. Kazana takviye olarak alınacak besi suyu, 3 numaralı hattan gelen enerjisi yüksek kondens ile eşanjörde karşılaşacaktır. Bu şekilde 1,5 t/h kapasiteli kondensin enerjisi kanala atılmadan önce kullanılmış olacak ve ölü hale yaklaştıktan sonra artık içerdiği safsızlıklar nedeniyle sistemden atılmak zorunda kalacaktır. Proses şartlarının eşanjör girişinde 95 °C ve çıkışında 45 °C olduğu ve eşanjör verimi ve hat kayıpları ile birlikte sistem toplam verimin % 98 olduğu kabul edilirse getiri şu şekilde olacaktır;

$$Q_{in} + W_{in} + \sum_{in} m \theta = Q_{out} + W_{out} + \sum_{out} m \theta$$

$$W = 0 \text{ olacağından}$$

$$Q_{in} - Q_{out} = \sum_{in} m \theta - \sum_{out} m \theta \quad \text{olacaktır}$$

$$\theta = h + ke + pe$$

$$ke = 0 \text{ ve } kp = 0 \text{ olacağından}$$

$$\Delta \theta = \Delta h \text{ olacak ve } \Delta Q = m \Delta h \text{ olacaktır}$$

$$\Delta Q = 1500 \text{ kg/h} \times 138,6 \text{ kJ/kg} \times 0,98 = 20,83 \text{ Watt} \text{ kazanç sağlanacaktır.}$$

3. Son olarak ise, daha önce 2,5 t/h olarak kaybedilen su, projede bulunan flaş tankta 1 t/h'i kullanıldığı için artık debi 1,5 t/h'e düşeceğinden, sistem için üretilen takviye şartlandırılmış su ihtiyacı ve dolayısıyla su üretimi maliyetinden de tasarruf beklenmektedir. Bu kısımda herhangi bir enerji kaybı değil ama direkt olarak üretimden kazanç ile tasarruf sağlanmıştır.

4.3. İyileştirme Prosesinin Ekonomik Analizi

Sistemin revizyonu için gerekli yatırım; 1 adet flaş buhar tankı, 1 adet gövde-boru tipi eşanjör ve bu sisteme bağlı borulama-vana ekipmanlarından oluşmaktadır. . Seçilen malzemeler çerçevesinde 2016 yılı Kasım ayında buhar sistemleri imalatı hizmeti veren bir yerli firmadan alınan yatırım maliyeti ile Çizelge 4.1'de gösterilmiştir.

Yatırım maliyetinin en büyük kalemi olan flaş buhar tankı PN 16 basınç sınıfında olup St 37.2 malzemedan yapılmıştır. Her ne kadar kalite ve basınç indeksi açısından standart olan bir malzeme seçilmişse de, malzemenin kalınlığı, tank imalatında kullanılan özel ekipmanlar ve teknoloji gereksinimi nedeniyle yüksek maliyet ortaya çıkmaktadır.

En büyük ikinci maliyet kalemi ise ısı değiştiricidir. Bu ekipman, silindirik bir gövde ile bu gövde içine yerleştirilen birbirine paralel borulardan meydana gelir. Akışkanlardan birisi boruların içinden, diğeri ise gövde içinden akar. Ana elemanları, borular veya boru demeti, gövde, iki baştaki ayna adı verilen kafa parçaları, gövde içindeki akışı yönlendiren ve borulara destek olabilen şaşırtma levhaları veya destek çubuklarıdır. Gerek gövdenin gerekse de boruların çap ve sayılarının tespitinde, bunlar içinde akan akışkan hızları önemli olmaktadır. Hızın büyük olması ısı geçiş katsayısını arttırarak, daha kompakt ve ucuz ısı değiştiricisi konstrüksiyonuna imkan sağlar. Söz konusu sistemdeki suyun iyi şartlandırıldığı ve yüksek korozif bir etkisi olmadığı göz önüne alınarak bu revizyonda kullanılması planlanan ısı değiştiricisinin tüm malzemeleri karbon çeliği olacaktır. Burada maliyet yüksekliği yine imalatında kullanılan özel ekipmanlar ve teknoloji kaynaklıdır. Diğer maliyet kalemleri de göz önüne alındığında Çizelge 4.1'de listelendiği üzere malzeme kaynaklı bir yatırım maliyeti oluşacaktır.

Çizelge 4.1: Revizyon için gerekli ekipman maliyetleri

Flaş Buhar Tankı	86.000 TL
Isı deęiřtirgeci	48.000 TL
Vakum kırıcı	5.000 TL
Dip Blöf Sistemi	14.000 TL
Muhtelif Vana+Aktuator	33.000 TL
Borulama ve Fittings	11.000 TL
İzolasyon	6.000 TL
Çelik konstruksiyon	10.000 TL
Elektrik- Enstrüman	23.000 TL
SX80 Kontroler	9.000 TL
Ara Toplam	250.000 TL

Tank, eşanjör ve bunun gibi mekanik ekipmanların tedariki sonrasında söz konusu prosesin oluşturulması için montaj hizmeti alınması gerekmektedir. Bu tip montaj işlerinde genelde harcanan işçilik üzerinden faturalandırma yapılır. Yine enerji endüstrisinde montaj işleri yapan ve buhar sistemleri montajı hizmeti veren bir yerli firmadan alınan birim fiyat 2016 yılı Aralık ayı itibariyle 24,5 TL/adam*saat şeklindedir. Bu çalışmada planlanan revizyonun montajı kapsamında; mekanik ünitelerin montajı, borulama montajı, muhtelif kaynak işleri ve son olarak da izolasyon işçiliği hesaba katılarak toplam adam*saat işçilik 10 personel ile 26 iş günü üzerinden 2250 adam*saat olarak hesaplanmıştır. Yani bu kalemdeki ara işçilik toplamı 56.000 TL olması öngörülmüştür. Fiyat doğrulaması amacıyla imalatı yapan yerli firmanın montaj hizmeti teklifi istendiğinde ise işin tümü için oluşacak tüm yan hizmetler dahil 62.000 TL bir bedel talep etmiştir.

Mekanik montaj işleri yapan taahhüt firmaların daha çok kendi kulvarlarında uzmanlaşması nedeniyle projenin elektrik-enstrümantasyon sistemleri montajı kısmı farklı bir kulvarda değerlendirilmiştir. Endüstriyel elektrik-enstrümantasyon montajı yapan yine yerli firmadan birim fiyat üzerinden alınan işçilik fiyatı ise 27,5 TL/adam*saat'tir. 6 personel ile 10 iş günü içerisinde yapılması öngörülen projenin bu kısmının iş yükü 480 adam*saat olarak öngörülmek ile birlikte yaklaşık 14.000 TL olarak hesaplandığı işçilik maliyetleri çalışması Çizelge 4.2'de verilmiştir.

Çizelge 4.2: Revizyon için gerekli işçilik maliyetleri

Mekanik Montaj	26.000 TL
Borulama Montaj	22.000 TL
İzolasyon Montaj	8.000 TL
Elektrik-Enstrüman Montaj	14.000 TL
Ara Toplam	70.000 TL

Ekipman ve işçilik maliyetleri öngörüsünün ara toplamı 320.000 TL olup bu tip projelerde genel kabul ile % 10 oranında öngörülemeyen kısımlar için bütçe ayrılmalıdır. Bu şekilde detayı verilen prosesin yaklaşık olarak 350.000 TL tutarında bir yatırım maliyeti olacağı hesaplanmıştır.

Bunun yanı sıra sistemin enerji kazancı ve finansal olarak getirisi de aşağıda kırınımları ile hesaplanmış olup getirisi 3 aşamada incelenebilir;

1. Azalan iç ihtiyaç buhar tüketimine bağlı yakılan kömürün azalması için yapılan hesapta;

- 2016 yılı WCA (World Coal Association) ortalama kömür fiyatı 70 USD/ton
- Kömür kazanında kullanılan 1 ton kömür ile 10 t/h buhar üretilmektedir
- Enerji santralinin yıllık çalışma süresinin 8000 saattir

kabulleri yapılmış olup finansal getirisi;

$$0.1 \text{ t/h} \times 245 \text{ TL/ton} = 24.5 \text{ TL/saat kar (+)}$$

$$24.5 \text{ TL/saat} \times 8000 \text{ saat} = 196.000 \text{ TL/yıl olacaktır.}$$

2. Termodinamik analiz kısmında yapılan ek olarak konacak eşanjör ile yapılan hesapta buradaki enerjinin 20,83 W olduğu hesaplanmıştı ve Bu çalışmadaki buhar türbinin proste kullanılan ara buharı 6 bar 175 °C olup buhar entalpisi 2787.4 kJ/kg'dir.

$$\Delta Q = 1500 \text{ kg/h} \times 138,6 \text{ kJ/kg} \times 0.98 = 2787,4 \text{ x m}$$

m = tasarruf edilen buhar miktarı = 73,1 kg/h olacaktır ve bu buhar tonajı için de 7,31 kg/h kömür tasarruf edilecektir.

0,00731 t/h x 245 TL/ton x 8000 saat = 14. 320 TL/yıl olacaktır.

3. Son olarak da daha önceden blöf olarak atılmak suretiyle kanala giden su üretiminde 1 t/h lik azalma olacaktır. Ters Ozmos ünitesi ile ürettiği suyun maliyeti 2 TL/ton olarak kabul edildiğinde getiri şu şekilde olacaktır;

1 t/h x 2 TL/ton x 8000 saat = 16.000 TL/yıl olacaktır.

Bu değerlendirmeler sonunda toplam tasarruf edilen yaklaşık tutar;

196.000 TL + 14.000 + 16.000 = 226.000 TL/yıl olacaktır

Mali kazancın temeli olan kömür tüketimindeki tasarruf miktarını inceleyecek olursak;

0,1 t/h + 0,00731 = 0,10731 t/h

0,10731 t/h x 8000 saat = 858,48 t/yıl şeklindedir

Santralin yıllık yaklaşık tüketimi: 466.000 t/yıl olduğundan

858,48 / 466.000 = % 0,19 oranında kömür tasarrufu sağlanmıştır.

İlk Yatırım Maliyeti Geri Kazanma Faktörü

Projenin finansal sonuçları incelendiğinde;

Projenin yatırım tutarı olan 350.000TL'nin bugünkü değerinin ve iki sene sonraki değerinin incelenmesinde;

$$P = F \frac{1}{(1+i_{\text{eff}})^n} \quad \text{Formülünden yararlanılarak}$$

350.000 TL'nin 0,12 lik bir faiz oranı kabulü ile 2 yıl sonraki değeri yaklaşık olarak 439.000 TL olacaktır.

İlk yatırım için hesaplanan bu tutarın geri kazanma faktörü (CRF) hesabına göre ise;

$$\text{CRF} = \frac{A}{P} = \frac{439.000 \text{ TL}}{226.000 \text{ TL}} = 1,95 \text{ yani yaklaşık 2 yıl olarak çıkacaktır.}$$

Projenin mühendislik kısmı ve imalatları 5 ay ve saha uygulamalarının da 1 ay sürmesi planlanmaktadır. Bu yüzden yatırım kararı alındıktan 2 sene sonra yatırım maliyetini çıkartması öngörülmektedir. Devreye alınması sonrasında geri ödeme süresinin tamamlanmasını takiben ekipman arızaları ve periyodik bakımı hariç tutulduğunda sistemin 226.000 TL/yıl sürekli kazanç sağlaması beklenmektedir. Bu sonuçlara göre planlanan revizyon çalışmasının uygulanabilir olduğu öngörülmüştür.

Literatür incelemelerinde görülen diğer bilimsel çalışmalardan farklı olarak yapılan bu sistem sayesinde besi suyu ısıtılması işlemi buhar türbininden ekstra ara buhar çekişi yapılmaksızın gerçekleşmiş olacağından bu sayede türbin elektrik üretimi azalmayacaktır. Bu şekilde hem türbin hem sistem genel verimi olumsuz etkilenmeden tasarruf sağlanmış olacaktır.

Enerji santrali ilk dizaynında bu sistemin yapılmamış olmasının, işletme süresince ortaya çıkacak olan kazan dram deşarjlarının miktarlarının belirsizliğinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Bu tip santrallerdeki su döngüsündeki safsızlıklar ve bu proses etki eden ana parametreler ancak santralin 1 sene ve üzerinde işletmesi sonrası gerçek anlamda ortaya çıkmaktadır. Bu yüzden dram içeren kazanlı olan tüm enerji santrallerinin işletmesel parametreleri düzene oturduktan sonra bu çalışmaya benzer bir analiz yapması faydalı olacaktır.

Kazanılan enerji boyutlu kazançların yanı sıra, deşarj edilen su miktarındaki azalma sayesinde kazan besi suyuna takviye olarak beslenen su miktarı azalmış olup en önemli doğal kaynak olan su tasarrufu da gerçekleşecektir.

KAYNAKLAR

- Adibhatla, S., and Kaushik, S.C.,** 2017: “Exergy And Thermoeconomic Analyses Of 500 Mwe Sub Critical Thermalpower Plant With Solar Aided Feed Water Heating”, Applied Thermal Engineering 123 - 340–352
- Arikol, M.,** 1985: “Enerji Analizine Giriş”, Mae, Gebze.
- Baysal, E., ve Koçyiğit, E.,** 2007. “Enerji ve Ekserji Analizi Metoduyla Kayseri Şeker Fabrikasında Enerji Verimliliğinin Değerlendirmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara
- Bejan, A., Tsatsaronis, G., Moran, M.,** (1996). “Thermal Design and Optimization”, John Wiley and Sons, USA.
- Breeze, P.,** (2014). “Power Generation Technologies, 2 nd Edt., Elsevier Ltd.”, Oxford
- Cengel Y.A., and Boles M.A.,** (2007). “Thermodynamics an Engineering Approach”, 6th ed., Mc Graw-Hill Book Co
- Cochran, M.,** 2005: “Student Understanding of the Second Law of Thermodynamics and the Underlying Concepts of Heat, Temperature, and Thermal Equilibrium”, University of Washington.
- Ç. Geredeliöğlu,** 2011: “Çayırhan Termik Santrallerinin Enerji ve Ekserji Analizi”, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul
- Dincer, I., and Al-Muslim, H.,** 2002: “Thermodynamic Analysis of Reheat Cycle SteamPower Plants” International Journal of Energy Research, Vol. 25
- Ege, F,** 2012: “Afşin-Elbistan B Kömür Santralinin Ekserji Ve Termoekonomik Analizi ve Optimizasyonu”, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi

- EIA Report**, 2004: “Independent Statics and Analysis of Energy Information Administration Report”
- Erdem, H.H., Akkaya, A.V., Çetin, B., Dağdaş, A., Sevilgen, S.H., Şahin, B., Teke, İ., Güngör, C., Ataş, S.**, 2009: “Comparative Energetic And Exergetic Performance Analyses For Coal-Fired Thermal Power Plants İn Turkey”, *International Journal Of Thermal Sciences*, 48: 2179-2186
- Eskin, N., Güngör, A. ve Özdemir, K.**, 2009: “Effects of Operational Parameters on The Thermodynamic Performance of FBCC Steam Power Plant”, *Fuel*, 88:54-66.
- Eyice, S.**, 1963: “Buhar Türbinleri Hesap ve Konstrüksiyonu”, İstanbul
- Farhad, S., Saffar-Avval, M. and Younessi-Sinaki, M.**, 2008: “Efficient Design of Feedwater Heaters Network in Steam Power Plants Using Pinch Technology and Exergy Analysis”, *International Journal of Energy Research*, 32:1-11.
- Filiz Ç.**, 2012: “Bir Buhar Kazanın Enerji ve Ekserji Analizi Yoluyla Performansının Değerlendirmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük
- Gupta, M.K. ve Kaushik, S.C.**, 2009: “Exergetic Utilization of Solar Energy for Feedwater Preheating in A Conventional Thermal Power Plant”, *International Journey of Energy Research*, 10:1002
- Hepbasli, A.**, 2008: “A Key Review on Exergetic Analysis and Assessment of Renewable Energy Resources for a Sustainable Future” *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, vol.12
- Hocaoğlu D.**, 2008: “Termodinamik’in İkinci Kanunu ve Entropi Ders Notu-Marmara Üniversitesi”
- Karakurt, A.S.**, 2012. “Buhar Türbinlerinin Kısmi Yüklerdeki Performans Davranışlarının İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul
- Kotas T. J.**, (1985). “The Exergy Method of Thermal Plant Analysis”, Anchor Brendon Ltd., Tiptree.

- Küçükşahin, F.**, (2007). “Buhar ve Gaz Türbinleri, Birsen Yayınevi Ltd. Şti.”, İstanbul
- Kwon Y., and Kwak H.**, (2001). “Exergoeconomic Analysis of Gas Turbines Cogeneration Systems”, Exergy, Vol 1
- Little D. J.**, (1991). “Turbines, Generators and Associated Plant” Oxford
- Malizia, D., and Tarsitani, C.**, (1995). “Looking at the Second Law of Thermodynamics Through the Eyes of Maxwell’s Demon”
- Megep.**, 2008. “Enerji Üretimi” Elektrik Elektronik Teknolojisi Eğitim Kitabı, TC. Milli Eğitim Bakanlığı, Ankara
- Mert. M.S.**, 2010. “Bir Güç Santralinin Ekserjik ve Termoekonomik Analizi” Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul
- Mohammadi, A., Vandani K., Bidi M., and Ahmadi, F.**, 2015: “Exergy analysis and evolutionary optimization of boiler blowdown heat recovery in steam power plants recovery in steam power plants” Energy Conversion and Management 106- 1–9
- Norouzian, A., Mohammadia, A., Bidi, M., and Ahmadi, M.H.**, 2017: “Energy, Exergy And Economic Analyses Of A Novel System To Recover Waste Heat And Water In Steam Powerplants”, Energy Conversion And Management Volume 144, 15, Pages 351-360
- Özkan, E.**, 2009. “Erdemir Ereğli Demir Çelik Fabrikası Kojenerasyon ve Konvansiyonel Elektrik Üretim Tesislerinin Ekserji Analizi”, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul
- Rivero, R. and Anaya, A.**, 1997: “Exergy Analysis of Industrial Processes: Energy-Economy- Ecology”, Latin American Applied Research
- Rosen, M.A and Dinçer, İ.**, 2004: “Effect of Varying dead-state properties on energy and exergy analysis of thermal systems”, International Journal of Thermal Science, 43

- Srinivas, T., and Reddy, B.V.,** 2007: “Generalized Thermodynamic Analysis of Steam Power Cycles within“ Number of Feedwater Heaters”, Int.J. of Thermodynamics, 10:177-185.
- Szargut, J., Morris, R.D. and Steward, R.F.,** (1998). ” Exergy Analysis of Thermal, Chemical, and Metallurgical Processes” Hemisphere, New York.
- Şenel V.,** 2010. “Termik Santrallerde Besleme Suyu Ön Isıtılması”, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul
- Tekel E.,** 2006. “Termik Santrallerde Enerji ve Ekserji Analizi”, Yüksek Lisans Tezi, Pamukkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Pamukkale
- Tontu, M.,** 2006. “Energy And Exergy Analysis Of A Steam Power Plant”, Doktora Tezi, Çukurova Üniversitesi
- Tsatsaronis, G.,** (1999). “Design Optimization Using Exergoeconomics”, Thermodynamic Optimization Of Complex Energy Systems, Nato Sciences, 3. High Technology, Volume 69.
- Ünal F.,** 2009. “Bir Termik Santralin Ekserji Analizi”, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul
- Wall ,G.,** 1993: “Exergetics, Exergy, Ecology and Democracy-Concepts of a vital society”, Energy Systems and Ecology
- Wall, G., and Gong, M.,** 2001: “On Exergy and Sustainable Development- Part 1: Conditions and Concepts. Exergy” International Journal, Vol. 1

ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad: Mesut Özdilim

Doğum Yeri ve Tarihi: 03/04/1984 Bursa

Adres: Bahçelievler Mah. Şükrü Çevik Sok. Büker Apt.
No: 5/12

E-Posta: mesut.ozdilim@aksa.com

Lisans: Kocaeli Üniversitesi- Makine Mühendisliği

Mesleki Deneyim ve Ödüller: Akxa Akrilik Kimya Sanayi (2009-)

TEZDEN TÜRETİLEN YAYINLAR/SUNUMLAR

- Yüksel F., **Özdilim M**, Direk M., 2017, “Termik Santralde Enerji-Ekserji Analizi ve İyileştirme” 2. Uluslararası Mühendislik Mimarlık ve Tasarım Kongresi, Kocaeli-Türkiye.