

T.C.
GÜMÜŞHANE ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

AKKUYU NÜKLEER GÜÇ SANTRALİ'NİN TERMOEKONOMİK ANALİZİ
VE ATIK ISININ DEĞERLENDİRİLMESİ

YÜKSEK LİSANS

Elvin AĞTAŞ

TEMMUZ -2022
GÜMÜŞHANE



**T.C.
GÜMÜŞHANE ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**AKKUYU NÜKLEER GÜÇ SANTRALİ'NİN TERMOEKONOMİK ANALİZİ
VE ATIK ISININ DEĞERLENDİRİLMESİ**

**THERMOECONOMIC ANALYSIS AND EVALUATION OF WASTE HEAT OF
AKKUYU NUCLEAR POWER PLANT**

YÜKSEK LİSANS

Elvin AĞTAŞ

**TEMMUZ -2022
GÜMÜŞHANE**



**T.C.
GÜMÜŞHANE ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**AKKUYU NÜKLEER GÜÇ SANTRALİ'NİN TERMOEKONOMİK ANALİZİ
VE ATIK ISININ DEĞERLENDİRİLMESİ**

**THERMOECONOMIC ANALYSIS AND EVALUATION OF WASTE HEAT OF
AKKUYU NUCLEAR POWER PLANT**

YÜKSEK LİSANS

Elvin AĞTAŞ

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Cemalettin AYGÜN

**TEMMUZ-2022
GÜMÜŞHANE**

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK BEYANI

Yüksek Lisans Tezi olarak hazırlamış olduğum “**Akkuyu Nükleer Güç Santrali'nin Termoeconomik Analizi ve Atık Isının Değerlendirilmesi**” isimli bu tezimin, tamamen kendi çalışmam olduğunu, her alıntıya kaynak gösterdiğimi, alıntı yaptığım tüm çalışmaları kaynakçada belirttiğimi ve Gümüşhane Üniversitesi'nin lisanslı kullanıcısı olduğum intihal yazılım programı ile Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nün belirlediği kıstaslara uygun olarak raporladığımı taahhüt ederim. Tezimin kâğıt ve elektronik kopyalarının Gümüşhane Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü arşivinde saklanmasına izin verdiğimi onaylarım.

Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği'nin ilgili maddeleri uyarınca gereğinin yapılmasını arz ederim.

18/07/2022

.....
Elvin AĞTAŞ

TEŞEKKÜR

Bu çalışma, Gümüşhane Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans Tezi olarak hazırlanmıştır.

Çalışmalarım sürecince bana her zaman güvenen, başarılı olmam için daima teşvik eden, özverili yardımlarda bulunan, her türlü olanağı sağlayan, bu çalışmanın gerçekleşmesinde öneri ve katkılarının yanı sıra değerli zamanlarını esirgemeyen, bilgi ve tecrübelerinden sürekli faydalandığım, tez danışmanım değerli hocam Dr. Öğr. Üyesi Cemalettin AYGÜN'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca, Tez çalışmam esnasında desteğini esirgemeyen Anabilim Dalı Başkanım Doç. Dr. Mehmet BAŞOĞLU'na, Tez arkadaşlarım Ecem BULAT, İkrâm TAŞDEMİR ve Alperen OKUMUŞ' a, manevi desteklerinden dolayı Can Tamer SAYLAN'a ve değerli aileme teşekkür ederim.

Elvin AĞTAŞ
GÜMÜŞHANE, 2022

ÖZET

Günümüzde nüfusun ve teknolojik gelişmelerin hızla artmasıyla enerji ihtiyacımızda artmaktadır. Enerji denilince akla ilk gelen elektrik enerjisidir. Son yıllarda elektrik enerjisi üretimi için Nükleer Güç Santralleri (NGS) önemli bir potansiyeldir.

Bu çalışma kapsamında, ülkemizin ilk nükleer santrali olan Akkuyu Nükleer Güç Santrali (ANGS) için termoeconomik analiz gerçekleştirilmiştir. Analiz sonucu, NGS çalışma prensibi gereği çevreye atılan ısının faydalı ısıya dönüştürülmesi ile enerji üretim maliyetinin düşürülmesi aynı zamanda ısıl kirliliğin önlenmesi amaçlanmıştır.

Akkuyu Nükleer Güç Santrali'ne eşdeğer ekipman değerleri kullanılarak Engineering Equation Solver (EES) programında termodinamik analiz yapılmıştır. Termodinamiğin ikinci yasasına bağlı, maliyet analizi yöntemleri arasında en fazla kullanılan spesifik ekserji maliyetleme (SPECOC) yöntemi kullanılarak maliyet analizi yapılmıştır.

Çalışma sonucunda, ANGS'nin enerji ve ekserji verimleri sırasıyla %35 ve %68 olarak bulunmuştur. Tesisten atılan ısının dolaylı olarak tesise tekrar kazandırılmasıyla bölgesel ısıtmada (tesiste bulunan lojmanların, misafirhanelerin, ısınma, sıcak su ihtiyacı), bölgenin coğrafik şartları ve geçim kaynağı göz önünde bulundurularak sera ısıtma, ziraî kurutma ve ısıtmada kullanmak mümkündür. Böylelikle, %67.99 oranında atık ısı değerlendirilmiş, üretilen enerjinin birim maliyeti düşürülmüş ve aynı zamanda ısıl kirlilikte aynı oranda azaltılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Akkuyu, Atık ısı, Ekserji, Enerji, Termoeconomik analiz

SUMMARY

Today, with the rapid increase in population and technological developments, our energy needs are increasing. When it comes to energy, the first thing that comes to mind is electrical energy. Nuclear Power Plants (NGS) are an important potential for electric power generation in recent years.

Within the scope of this study, thermoeconomic analysis was carried out for Akkuyu Nuclear Power Plant (ANGS), the first nuclear power plant of our country. As a result of the analysis, it is aimed to reduce the cost of energy production by converting the heat released to the environment into useful heat as per the NPP operating principle, and to prevent thermal pollution at the same time.

Thermodynamic analysis was carried out in the Engineering Equation Solver (EES) program using equipment values equivalent to Akkuyu Nuclear Power Plant. Cost analysis was carried out using the most widely used specific exergy costing (SPECOC) method, which is based on the second law of thermodynamics.

As a result of the study, the energy and exergy efficiencies of ANGS were found to be 35% and 68%, respectively. By indirectly regaining the heat from the facility, it can be used in district heating (heating, hot water needs of the lodgings, guesthouses in the facility), greenhouse heating, agricultural drying and cooling, taking into account the geographical conditions and livelihood of the region. Thus, 67.99% of waste heat was utilized, the unit cost of the energy produced was reduced and at the same time thermal pollution was prevented at the same rate.

Keywords: Akkuyu, Waste heat, Exergy, Energy, Thermoeconomic analysis

İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY	III
BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK BEYANI	IV
TEŞEKKÜR.....	V
ÖZET	VI
SUMMARY	VII
İÇİNDEKİLER	VIII
TABLOLAR DİZİNİ	X
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	XII
EKLER DİZİNİ.....	XIV
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	XV
1. GİRİŞ.....	1
2. GENEL BİLGİLER.....	3
2.1. Enerji.....	3
2.1.1. Enerji Kaynakları	3
2.2. Nükleer Enerji.....	6
2.3. Nükleer Reaktörler	10
2.3.1. Nükleer Reaktörlerin Temel Bileşenleri	10
2.3.2. Nükleer Reaktör Tipleri	15
2.4. Nükleer Güç Santralleri	24
2.4.1. Nükleer Güç Santralleri Çalışma Prensibi ve Çevrim Özellikleri	25
2.4.2. Akkuyu Nükleer Güç Santralinin Tanıtımı ve Gelişimi	27
2.4.3. Akkuyu Nükleer Güç Santrali Çevrimi ve Özellikleri	32
2.5. Enerji ve Ekserji	34
2.6. Ekserji Analizi	36
2.6.1. Ekserji Çeşitleri	37
2.7. Termodinamik Analiz.....	40
2.7.1. Termodinamiğin Birinci Yasası.....	43
2.7.2. Termodinamiğin İkinci Yasası	46
2.7.3. Kullanılabilirlik ve Kullanılabilir Enerji	46
2.7.4. Rankine Çevrimi Isıl Verimi	47
2.8. Termoekonomik / Eksergoekonomik Analiz	48

3. METOD VE YÖNTEM.....	60
4. BULGULAR VE İRDELEME	69
5. SONUÇ VE DEĞERLENDİRME.....	86
KAYNAKÇA.....	88
ÖZGEÇMİŞ	88



TABLÖLER DİZİNİ

Tablo 1. Genel nükleer enerji tarihi	7
Tablo 2. Türkiye nükleer enerji tarihi	8
Tablo 3. Bir reaktörü oluşturan bileşenlerin malzemeleri ve işlevleri	12
Tablo 4. VVER-1200 teknik özellikler	23
Tablo 5. Ülkemizde kurulumu planlanan güç santrali kurulum ve işletim aşamaları.....	23
Tablo 6. Bir Nükleer güç santralin kurulması gereken yerde yapılan araştırmalar	24
Tablo 7. Akkuyu NGS projesinin gelişimi.....	29
Tablo 8. Enerji ve Ekserji karşılaştırması	35
Tablo 9. Nükleer santraller için yatırım maliyetini oluşturan önemli kalemler	50
Tablo 10. Literatür araştırmaları	53
Tablo 11. Tesis verileri	60
Tablo 12. Nükleer sisteme ait genel veriler sunulmuştur.....	61
Tablo 13. Reaktör özellikleri.....	61
Tablo 14. Reaktör soğutma sistemi.....	61
Tablo 15. Türbin özellikleri	61
Tablo 16. Jeneratör özellikleri.....	62
Tablo 17. Kondenser özellikleri.....	62
Tablo 18. Basınçlandırıcı özellikleri	62
Tablo 19. Akış ekserjisi eşitlikleri	62
Tablo 20. Enerji ve ekserji eşitlikleri	63
Tablo 21. Yakıt ve ürün ekserjisi	64
Tablo 22. Akkuyu nükleer güç santrali'nin maliyet analizi.....	65
Tablo 23. Ekserjiye bağlı maliyet eşitlikleri ve birim ekserji maliyet denklikleri.....	65
Tablo 24. Mersin için ısınma amaçlı konut başına düşen aylık ortalama doğal gaz tüketim miktarı	66
Tablo 25. Mersin için sıcak su kullanım amaçlı konut başına düşen aylık ortalama doğal gaz tüketim miktarı.....	66
Tablo 26. Sera tipleri ve özellikleri.....	67
Tablo 27. Akdeniz iklim kuşağındaki bazı illerin Tip-1 sera için aylara göre ısı gereksinimi	67
Tablo 28. Meyve ve sebze kurutma tesisi elektrik giderleri	68

Tablo 29. Termodinamik veriler	70
Tablo 30. Enerji ve Ekserji değerleri	71
Tablo 31. Akkuyu Nükleer Güç Santrali'nin termodinamik sonuçları	76
Tablo 32. Akkuyu Nükleer Güç Santrali bileşenleri için ilk yatırım (IC), işletme ve bakım maliyetleriyle (OM) ilişkili toplam maliyet oranları	78
Tablo 33. Akkuyu Nükleer Güç Santrali bileşenlerinin toplam maliyet oranları	79
Tablo 34. Akkuyu Nükleer Güç Santrali bileşenlerinin ekserjiye bağlı ürün ve yakıt maliyetleri,ekserji yıkım maliyetleri, eksergoekonomik faktörleri ve toplam yatırım maliyetleri	82
Tablo 35. Kullanım alanlarına göre kullanılabilir ısı miktarları	82
Tablo 36. Atık ısının değerlendirilme oranları.....	83



ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. Enerji kaynaklarının sınıflandırılması.....	4
Şekil 2. Dünya’da birincil enerji kullanımı.....	5
Şekil 3. Dünya’da birincil enerji kaynakları ile elektrik enerjisi üretim oranları	5
Şekil 4. Dünya’da elektrik enerjisi üretiminde kaynak türlerinin kullanımı.....	6
Şekil 5. Tipik bir fisyon reaksiyonu.....	9
Şekil 6. Tipik bir füzyon reaksiyonu.....	10
Şekil 7. Zincirleme reaksiyon mekanizması	10
Şekil 8. Yer altında inşa edilen nükleer deneme reaktörü.....	11
Şekil 9. Reaktörü oluşturan temel bileşenler.....	11
Şekil 10. Nükleer yakıt demeti.....	13
Şekil 11. Yavaşlatıcı (Moderatör).....	13
Şekil 12. Kontrol çubukları	14
Şekil 13. Nükleer reaktör tipleri.....	15
Şekil 14. Dünya’da en çok kullanılan reaktör tipleri	16
Şekil 15. Basınçlı su reaktörleri	17
Şekil 16. Kaynar sulu reaktörler.....	18
Şekil 17. Basınçlı ağır su reaktörü (Pressurized Heavy Water Reactor,PHWR)	19
Şekil 18. Gelişmiş gaz soğutmalı reaktör.....	20
Şekil 19. VVER-1000 Reaktörün şematik gösterimi	21
Şekil 20. VVER-1200 Reaktörün şematik gösterimi	22
Şekil 21. VVER-1200 (AES 2006) reaktörünün bulunduğu bina.....	22
Şekil 22. VVER-1200 yakıt demeti	23
Şekil 23. Nükleer güç santrallerinin çalışma prensibi.....	26
Şekil 24. Nükleer güç santralleri birimleri.....	26
Şekil 25. (a) Gerçek buharlı güç çevriminin ideal rankine çevriminden farklılığı. (b) Pompa ve türbindeki tersinmesliklerin ideal rankine çevrimi üzerindeki etkisi.	27
Şekil 26. Akkuyu NGS, güç santrali projesi	29
Şekil 27. Akkuyu NGS güç ünitesi ve güvenlik akış şeması	33
Şekil 28. Akkuyu NGS ikinci çevrim akım şeması	34
Şekil 29. Ekserji bileşenleri.....	37

Şekil 30. Sistem, sınır ve çevre	40
Şekil 31. SPECO yönteminin analiz şeması	49
Şekil 32. Nükleer güç santrallerinden atılan ısı	59
Şekil 33. Akkuyu NGS, güç santrali projesi	59
Şekil 34. Mersin ili kişi başı elektrik tüketimi	68



EKLER DİZİNİ

Ek 1. EES Termodinamik Çözümler.....	93
Ek 2.Doğal Gaz Dağıtım Şirketinden Veri Talep ve Cevap Yazısı	95



SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

$\dot{D}_D$	: Ekserji yıkım maliyeti (\$/h)
$\dot{E}_x$	: Ekserji (kW)
$\dot{W}_{net}$	: Üretilen net iş
$\dot{Z}_t$	: Toplam maliyet (\$)
$\dot{Z}_k^{cl}$	: k Ekipmanının yıllık sermaye yatırımı
$\dot{Z}_k^{OM}$	: k Ekipmanının işletme, bakım maliyeti
$\dot{C}$	: Maliyet oranı (\$/h)
E_{x_f}	: Fiziksel Ekserji
E_{x_k}	: Kimyasal Ekserji
$E_{x_{kin}}$	: Kinetik Ekserji
$E_{x_{pot}}$	: Potansiyel Ekserji
E_{x_t}	: Termal Ekserji
E_{x_w}	: İş ekserjisi
$E_{\dot{c}}$	: Çıkan enerji (kJ)
E_g	: Giren enerji (kJ)
P_0	: Ölü hal basıncı
$\dot{Q}$	: Birim zamanda ısı geçişi (kW)
T_0	: Ölü hal sıcaklığı
$\dot{W}$	: Güç, birim zamanda yapılan iş (kW)
$\dot{m}$	: Kütleli debi (kg/s)
s_0	: Ölü hal entropisi
AGCR	: Gelişmiş Gaz Soğutmalı Reaktör (Advanced Gas Cooled Reactor)
ANGS	: Akkuyu Nükleer Güç Santrali
atm	: Atmosfer
BWR	: Kaynar Sulu Reaktör (Boiling Water Reactor)
CANDU	: Kanada Döteryum Uranyum Reaktörü (CANadian Deuterium Uranium)
EES	: Mühendislik Denklem Çözücü (Engineering Equation Solver)
EPDK	: Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu
FBR	: Hızlı Üretken Reaktör (Fast Breeding Reactor)
GCR	: Gaz Soğutmalı Reaktör (Gas Cooled Reactor)

h	: çevre koordinatlarına göre yükseklik
h	: Entalpi (kJ/kg)
IC	: Yıllık sermaye yatırımı
LWGR/RBMK:	Grafit Yavaşlatıcılı Su Soğutmalı Reaktör (Light Water Graphite Reactor)
LWR	: Hafif Sulu Reaktör (Light Water Reactor)
NGS	: Nükleer Güç Santrali
OM	: İşletme-bakım maliyetleri
PE	: Polietilen
PEC	: Satın alınan ekipman maliyeti (Purchased Equipment Cost)
PHWR	: Basınçlı Ağır Su Reaktörü (Pressurized Heavy Water Reactor)
PWR	: Basınçlı Su Reaktörü (Pressurized Water Reactor)
SPECO	: Spesifik Ekserji Maliyeti Metodu (SPecific Exergy COsting)
TAEK	: Türk Atom Enerjisi Kurumu
VVER/WWER:	Su Soğutmalı ve Su Moderatörlü Reaktör (Voda-Vodyanoi Energetichesky Reaktor) / (Water-cooled Water-moderated Power Reactor)
C	: Ekserji fiyatı (\$/kJ)
P	: Basınç (kPa)
Q	: Isı Enerjisi (kJ)
T	: Sıcaklık (°C, K)
V	: Hacim (m^3)
W	: iş (kJ)
c	: Birim ekserji fiyatı (\$/GJ)
f	: Termoekonomik (eksergoekonomik) faktör
g	: yerçekimi ivmesi (m/s^2)
n	: Sistem ömrü
r	: Bağlı maliyet farkı (%)
s	: Özgül entropi (kJ/kgK)
z	: Akışkanın yüksekliği
ε	: Ekserjik verim (%)
η	: Enerji verimi
ν	: Özgül hacim (m^3/kg)
ψ	: Akış Ekserjisi / Kullanılabilirlik (kJ/kg)

1. GİRİŞ

Günümüzde dünya nüfusunun hızlı artışı ve teknolojinin gelişimiyle enerji gereksinimi gittikçe büyümektedir (Çukurçayır ve Sağır, 2008). Bu nedenle mevcut enerji kaynaklarımızı geliştirmek, enerji kaynaklarımızın israf edilmesini engellemek ve alternatif enerji kaynaklarımızın ihtiyaç doğrultusunda üretimini arttırmak dünya ülkelerinin önemli amaçları arasında yer almaktadır. Modern yaşamın temel ihtiyacı olan enerjinin; güvenilir, yeteri miktarda, zamanında, ve düşük maliyetle temin edebilmenin önemi giderek artmaktadır. Özellikle farklı formlarda kullanılabilirliği ve dönüştürülebilirliği açısından elektrik ve ısı enerjisi oldukça önemlidir. Günümüzde elektrik enerjisinin yaklaşık %80'i fosil kökenli yakıtlardan ve nükleer enerjiden sağlanmaktadır. Son yıllarda enerji kaynaklarımızdan elektrik enerjisi üretimi için Nükleer Enerji Santralleri önemli bir potansiyeldir (Ağaçbiçer, 2010).

Nükleer Enerji Santralleri, enerji kaynağı olarak atom parçacıklarını ayıran (fizyon) veya birleştiren (füzyon) reaksiyonların gerçekleştiği santrallerdir. Bu santraller buharlı güç çevrimine (Rankine çevrimi) göre çalışırlar. Kullanılan yakıttan en yüksek oranda, enerji elde edilmesi beklenir. Ancak yakıttan elde edilen enerjinin tamamının mekanik enerjiye dönüşümü imkânsızdır. Isıl enerjinin mekanik enerjiye dönüşümü gerçekleşirken enerjinin bir kısmı –buhar çevrimi gereği- çevreye atık ısı olarak bırakılmaktadır (Şekil 1).

Bu durum çevrenin ısıl kirliliğine sebebiyet vermektedir. Isıl kirliliği azaltmak amacı ile atık ısının daha verimli halde kullanılması ekserji ile sınırlıdır. Ekserji sınırlarında, enerji dönüşümleri gerçekleşmektedir. Enerji üretim, dönüşüm sistemlerinin ve sistemleri oluşturan ekipmanların ekserjiye göre değerlendirilmesi yapılmaktadır. Bu analiz yöntemi ekserji analizi olarak adlandırılmaktadır. Bu analiz ile sistemlerde, tesinmezliklerden kaynaklanan kayıplar tespit edilmekte ve gerçekleştirilmesi gereken iyileştirmeler belirlenmektedir. Tesislerin enerji planlamalarında sadece ekserji dengelerinin kurulup kayıpların tespit edilmesi yeterli olmamaktadır. Ekonomik boyutlarının da incelenmesi gerekmektedir. Bu bağlamda termoekonomi analiz çalışmaları bir zorunluluk haline gelmektedir. Bu analiz, termodinamiğin ikinci yasasına bağlı olarak güç santralinin maliyetlerini dikkate alan bir çözümdür (Yazıcı vd., 2011).

Maliyet ve yatırım süresine ilişkin açıklamalarda ise Türkiye Atom Enerjisi Kurumu, dünya ülkelerinde nükleer santrallerin tamamlanma süresinin ilk beton dökülmesinden itibaren yaklaşık 6-7 yıl, tüm proje süreci düşünüldüğünde ise bu sürenin 10-12 yıl civarında olabileceğini belirtmiştir. Dünya ülkelerinde işletmeye alınan son reaktörler ve yapım süreleri incelenecek olursa, Rusya Federasyonu'nda bulunan Rostov-2 santralının yapım süresinin 9 yıl, Çin'de bulunan Lingao-3 santralının 5 yıl, Qinshan-2 ve 3 santrallerinin 4.5 yıl, Hindistan'da bulunan Rajastan-5-6 santrallerinin her ikisinin de yedişer yıl ve Japonya'da bulunan Tomari-3 santralının ise 4.5 yılda işletmeye alındığı bildirmişlerdir. Proje maliyetine ilişkin açıklamalarda ise reaktörün modeli, yeri, gücü, kurumsal, yasal ve kredi koşulları gibi pek çok kriter maliyet durumunda etkili olmaktadır. Nükleer reaktörler işletme ve yakıt maliyeti yönünden düşük fakat ilk yatırım maliyetleri yönünden yüksek enerji tesisleridir. Reaktörün tüm faktörleri göz önünde bulundurulursa, elektrik üretim maliyetinin diğer enerji çeşitleri ile kıyaslanabilir ve rekabet edebilir olması önem kazanmaktadır (URL-1, 2020).

Tesisler üzerinde termoekonomik analiz, maliyet değerlendirmeleri ile ilgili çalışmalar yapılmıştır. Nükleer Güç Santralleri üzerine yapılan çalışmalarda ise santrallerin kurulumu, aşamaları, özellikleri, atık depolama yöntemleri incelenmiştir. Literatürde bu tür çalışmalar yapılmasına rağmen Akkuyu Nükleer Güç Santrali'nin termoekonomik analizi ve atık ısının değerlendirilmesi gibi bir çalışma yapılmamıştır.

Bu çalışmada; Akkuyu NGS çalışma prensibi gereği çevreye atılan ısının dolaylı olarak tesise tekrar kazandırılmasıyla bölgesel ısıtmada (tesiste bulunan lojmanların, misafirhanelerin, ısınma, sıcak su ihtiyacı), bölgenin coğrafik şartları ve geçim kaynağı göz önünde bulundurularak sera ısıtmada, zirai kurutma ve soğutmada kullanılması sonucu enerji üretim maliyetinin düşürülmesi aynı zamanda ısıl kirliliğin önlenmesi incelenmiştir.

2. GENEL BİLGİLER

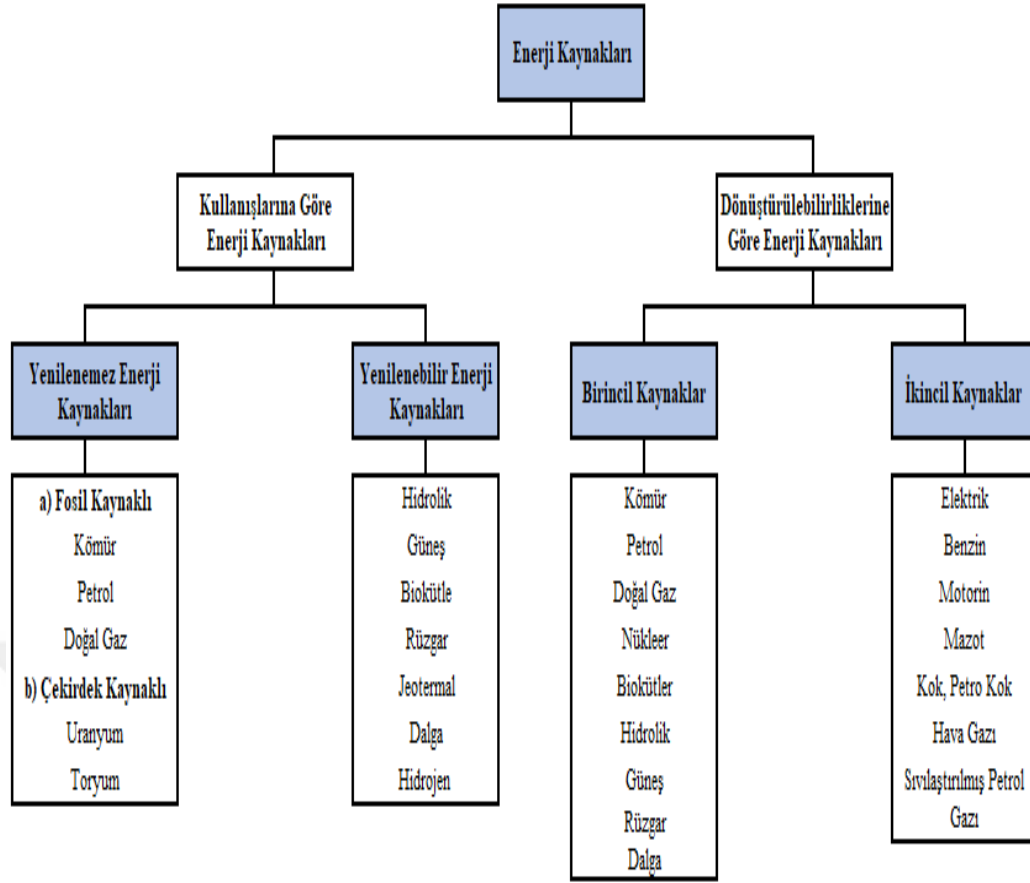
2.1. Enerji

Bir canlının metabolik faaliyetlerinden bir tesisin üretim sistemlerine kadar hayatımızın her alanında yer alan enerji kavramı ilk defa Thomas Young tarafından 1807 yılında, bir maddenin ya da maddeleri oluşturduğu sistemler bütününe iş yapabilme yeteneği olarak tanımlanmıştır (URL-2, 2022). Kimyasal ve fiziksel tepkimelerde ısı, elektrik, mekanik veya manyetik formlarda kullanılabilir. Ayrıca bu formlara dönüştürülebilir. Termodinamiğin birinci yasasına göre enerji asla kaybolmaz, korunur. Sistem ile çevre arasındaki dengeye ulaşana kadar kaybolan enerji, çevrenin kazanmış olduğu enerjiye eşit olmalıdır. Sisteme enerji giriş ve çıkışı, ısı ya da iş olarak gerçekleşebilir (Tüysüz, 2013).

Dünya genelinde stratejik ve ekonomik önemini koruyan enerji, ülkelerinin gelişmişlik düzeyine bağlı olarak, temel ihtiyaç haline gelmiştir (Özdilim, 2017). Gelişmiş ülkelerin ve gelişmekte olan ülkelerin asıl amacı, ekonominin ve toplumun ihtiyaç duyduğu enerjiyi güvenilir, kesintisiz, temiz, verimli ve ucuz şekilde temin etmek aynı zamanda kaynak çeşitliliğini arttırmaktır (İncekara ve Oğulata, 2011).

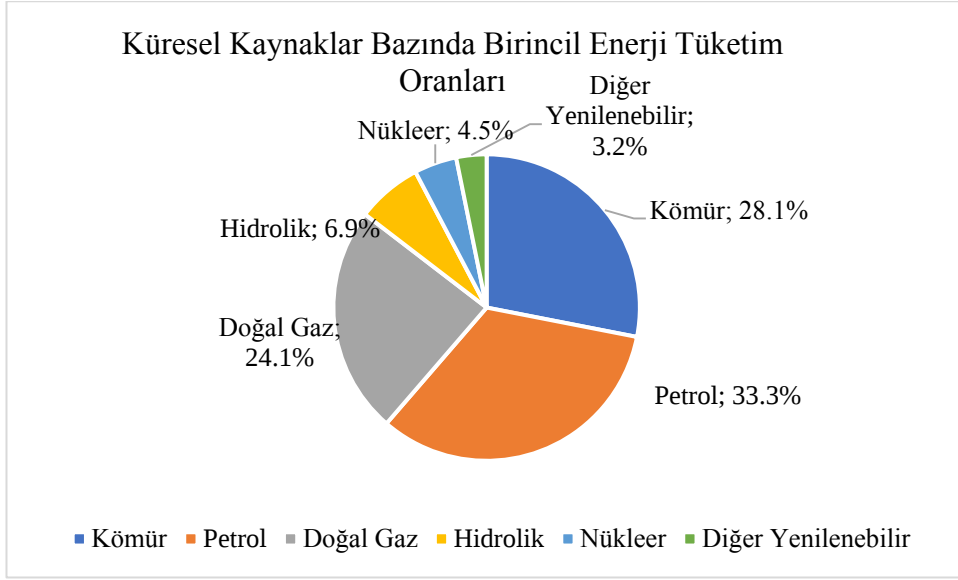
2.1.1. Enerji Kaynakları

Enerji kaynakları kullanışlarına ve dönüştürülebilirliklerine göre iki ana başlık altında incelenmektedir. En yaygın sınıflandırma sürdürülebilirliklerine yani dönüştürülebilirliklerine göre yapılmaktadır. Dönüştürülebilirlik özelliklerine göre enerji kaynaklarımız ise birincil ve ikincil olarak sınıflandırılmaktadır (Şekil 1).

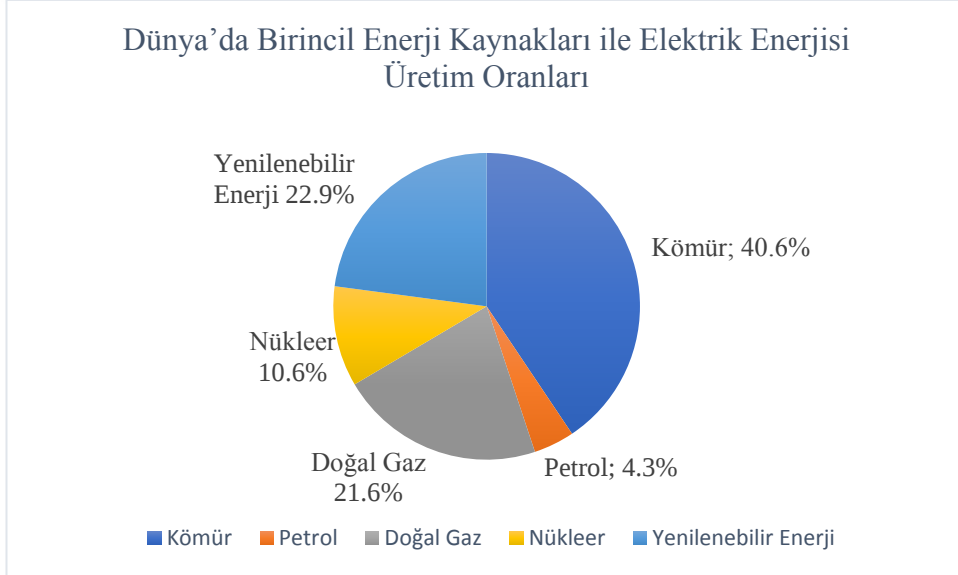


Şekil 1. Enerji kaynaklarının sınıflandırılması (Karagöz, 2020).

Birincil enerji kaynakları, hayvan ve bitki kökenli olup doğada bulunduğu şekilde kullanılabilen kaynaklardır (Geredelioğlu, 2011). Doğal gaz, petrol, kömür, hidrolik, biyokütle, güneş, rüzgâr, nükleer ve dalga-gelgit birincil enerji kaynaklarımıza örnek gösterilebilir. Fosil yakıtlar, dünya’da en fazla tüketilen birincil enerji kaynaklar arasında ilk sıradadır. Şekil 2’te görüldüğü gibi, %33.3 kullanım oranı ile fosil kaynak türlerinden petrol, en çok kullanılan birincil enerji kaynağımızdır (Yücer, 2016). Ayrıca Dünya’da elektrik üretiminin büyük bir bölümü birincil enerji kaynaklarımızdan üretilmektedir. Şekil 3’te Dünya genelinde birincil enerji kaynaklarımızdan elektrik üretim oranları yer almaktadır.



Şekil 2. Dünya’da birincil enerji kullanımı (Koç vd., 2018).

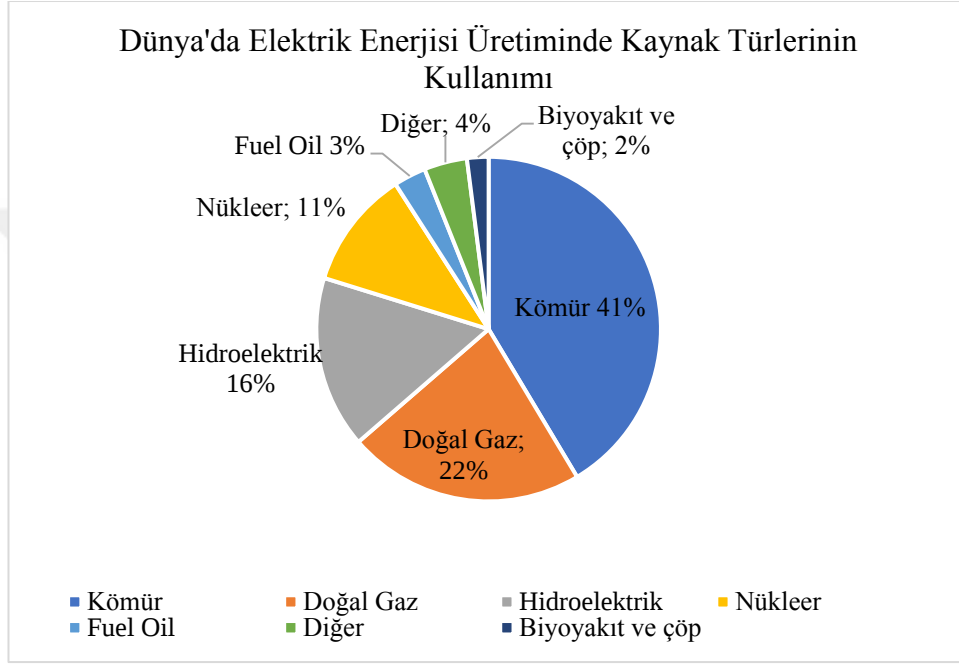


Şekil 3. Dünya’da birincil enerji kaynakları ile elektrik enerjisi üretim oranları (Koç vd., 2018).

Birincil enerji kaynaklarının dönüştürülmesi ve işlenmesi ile ikincil enerji kaynakları elde edilmektedir. İkincil enerji kaynaklarının oluşumu için birincil enerji kaynaklarına ihtiyaç vardır. Birincil enerji kaynaklarının belirli işlemlerden geçirilerek dönüştürülebilmesi için nükleer santraller, termik santraller, petrol rafinerileri vb. gibi bilim ve teknolojinin rol oynadığı altyapı yatırımlarına ihtiyaç vardır. İkincil enerji kaynağı denilince akla ilk gelen elektrik enerjisidir. Günümüzde elektrik enerjisinin yaklaşık %80’i nükleer enerjiden ve fosil kökenli yakıtlardan sağlanmaktadır. Son yıllarda nükleer enerji santralleri, elektrik üretimi için önemli bir potansiyele sahiptir (Ağaçbiçer, 2010).

Gelecekte artan enerji ihtiyacının nükleer enerjiden elde edilmesi alternatif öngörülerden biridir. Ülkemizin enerji kaynakları profiline göre; nükleer enerjide kullanılan fosil yakıtlarda dünya kaynaklarının %1'ine sahipken, toryum miktarı bakımından yaklaşık %54'üne sahiptir (Turgut, 2011).

Dünya'daki kaynaklara göre elektrik enerjisi üretimi en fazla fosil kaynaklı yakıtlardan kömür ile sağlanmaktadır. En düşük miktarda elektrik enerjisi üretimi ise %2 oran ile Biyoyakıt ve çöpten sağlanmaktadır (Şekil 4).



Şekil 4. Dünya'da elektrik enerjisi üretiminde kaynak türlerinin kullanımı (Bilim, 2016).

2.2. Nükleer Enerji

Fransız fizikçi Henri Becquerel tarafından uranyum madeninin fotoğraf plakaları ile birlikte durması ve x-ray ışınlarının karanlıkta yayılması sonucu nükleer enerji keşfedilmiştir. Keşfedilen bu enerji türü yaklaşık %16 pay ile enerji üretiminde dünyanın önemli ve sınırlı enerji kaynakları içerisinde, fosil kökenli yakıtlar dışında yer almaktadır. Ayrıca atık yönetimi ve güvenilirlik konularıyla sıkça gündemde olan bir enerji türüdür (Kaya, 2012). 1930'lu yıllarda ise nötronların keşfedilmesi ile ortaya çıkan ve yıl bazlı gelişim aşamalarının kaydedildiği nükleer enerji tarihçesi Tablo 1'de gösterilmiştir.

Tablo 1. Genel nükleer enerji tarihi (URL-3, 2017).

YIL	TARİHÇE
1930'lar	İlk olarak nötronlar keşfedilmiştir. Oluşan nötronların uranyum ile tepkimeye girmesi ve bölünmenin gerçekleşmesiyle, fisyon olayı keşfedildi.
1940'lar	İlk zincirleme nükleer reaksiyon Enrico Fermi tarafından gerçekleşti. Little Boy (küçük çocuk) lakabıyla bilinen Hiroşima atom bombası ardından üç gün sonra Fat Man (Şişman Adam) lakabı ile bilinen Nagasaki atom bombası Japonya'ya atıldı. 15 Ağustos'ta Japonya'nın teslim olması sonucu İkinci Dünya Savaşı sona erdi. Nükleer enerji çalışmalarını kontrol altına alabilmek ve nükleer enerjinin faydalı amaçlarla kullanımını sağlamak amacıyla 1946 yılında kabul edilen ve yayımlanan Atom Enerjisi Yasası ile Atom Enerjisi Komisyonu (AEC) oluşturuldu.
1950'ler	Dört ampulün Deneysel Üretken Reaktör I (EBR-I) ile aydınlatılmasıyla, ilk kez elektrik enerjisi nükleer enerjiden üretildi. ABD donanmasının Nautilus isimli ilk nükleer güç özelliği taşıyan denizaltı nükleer güç ünitelerini ilk defa devreye aldı. Dünya'nın ilk nükleer enerji ile çalışan elektrik jeneratörü, Obninsk'de faaliyete geçti. AM-1 (Atom Mirny – barışçıl atom) reaktörü, Su soğutmalı, grafit moderatörlü, 30 MWt ya da 5MWe tasarım kapasitesine sahipti. 1954 yılında Başkan Eisenhower tarafından Atom Enerjisi Yasası imzalandı. Bu yasa ile nükleer teknolojiye ve sivil nükleer enerji programına daha fazla erişim olanağı sağlandı. Kaynar sulu deneysel kullanım reaktörü, BORAX III tarafından ilk kez nükleer enerjiyle 1000 nüfuslu Arco, Idaho şehirlerine elektrik sağlandı. Birleşmiş Milletler tarafından, dünya genelinde nükleer silahların yayılımını önlemek ve nükleer enerjinin faydalı kullanımını teşvik etmek amacıyla Avusturya ve Viyana'da Uluslararası Atom Enerjisi Ajansı (IAEA) kuruldu.
1960'lar	Amerika Birleşik Devletleri tarafından uzaydaki ilk nükleer reaktör (SNAP-10A) gönderildi ve ay üzerinde bulunan bir nükleer pil üç yıl süresince kesintisiz çalıştı.
1970'ler	Fransa'da yaşanan petrol krizinin ardından büyük bir enerji programı başlatıldı. Three Mile Adası reaktör kazası olan, Amerika Birleşik Devleti tarihinin en büyük nükleer kazası olan meydana geldi. Kaza, insan hatası ve mekanik hata sebeplerinden dolayı reaktör korunda meydana gelen soğutma suyu kaybı sebebi ile gerçekleşti. Kazanın ardından yapılan açıklamalara göre yüksek radyasyona maruz kalınmadığı bildirildi.
1980'ler	Amerika Birleşik Devletleri'nde ilk kez nükleer enerji ile petrol kullanılarak elde edilen elektrikten daha fazla elektrik üretildi. 1982 yılında yüksek seviyeli nükleer atıklar için atık deposu geliştirilmesini kabul eden Nükleer Atık Politikası Yasası imzalandı. Dünya'nın en büyük nükleer reaktör kazası, Ukrayna'da bulunan Çernobil Nükleer Santralinde meydana geldi. İlk yüksek seviyeli nükleer atık deposu çalışmaları için Nevada'daki Yucca Dağı, seçildi.

Tablo 1. (Devamı)

YIL	TARİHÇE
1990'lar	20.000 adet nükleer silahın enerjisini elektriğe dönüştürerek faydalı hale getirecek "Megatonlardan Megawattlara" programı başlatıldı. Sökülen Rus savaş başlıklarından ABD elektriğinin yaklaşık %10'u sağlanmış oldu.
2000'ler	Dünyanın en eski nükleer güç santrali özelliği taşıyan Obninsk tek reaktörünü kapattı. Fukushima nükleer santralinde 11 Mart 2011 tarihinde meydana gelen 9,0 şiddetindeki deprem ve ardından tsunami sebebiyle santral enkaz durumuna döndü. Gıda ürünlerine ve suya yayılan ve kitlesel tahliyelere neden olan nükleer erimeyi tetikledi.

Ülkemizde, 1950'li yılların başlarından itibaren nükleer enerjinin gelişimini gösteren, Türkiye nükleer enerji tarihi ise Tablo 2'de gösterilmiştir.

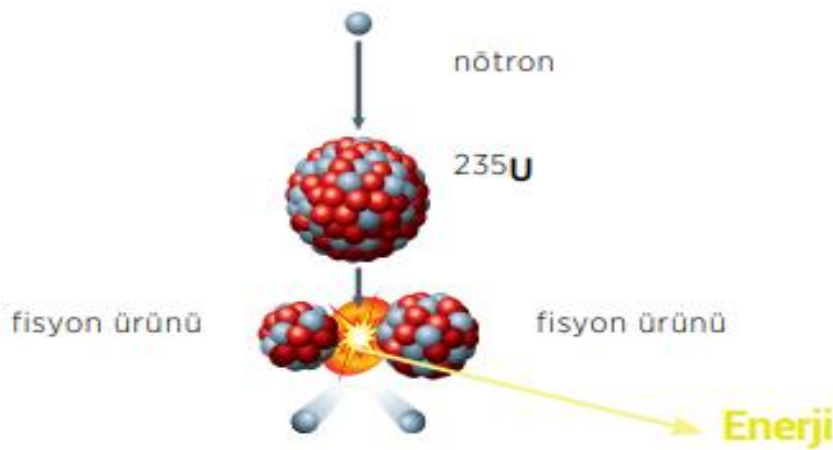
Tablo 2. Türkiye nükleer enerji tarihi (URL-3, 2017).

YIL	TARİHÇE
1950'ler	Ülkemiz, Cenevre'de nükleer enerjinin faydalı kullanımına yönelik anlaşmayı imzalayan ilk ülkelerden oldu. İmzalanan anlaşmanın ardından, ülkemiz nükleer teknolojinin gelişimini amaçlayan teknik altyapı ve bilime dayalı insan gücünü geliştirmeye yönelik çalışmalara başladı. Ülkemiz, Uluslararası Atom Enerjisi Ajansı'na üye oldu.
1960'lar	Türkiye'nin ilk araştırma reaktörü olan TR-1, 1 MW güç ile Çekmece Nükleer Araştırma ve Eğitim Merkezi'nde çalışmaya başladı. Yapılan araştırmalar sonucu, Ülkemizde ilk nükleer santralının Akkuyu'da kurulması ve 600 MW güce sahip olması gerektiği belirlendi. Deprem riskinin en az olduğu bölge Akkuyu seçildi ve nükleer santral lisansını aldı.
1970'ler	Teklif sürecinin değerlendirilmesinin ardından 600 MW gücündeki Kaynar Sulu Reaktör (BWR)'ü için İsveç şirketlerinden oluşan konsorsiyum seçildi. Olumsuz siyasi durumlar ve İsveç hükümetinin kredi garantisi vermemesi sebebiyle müzakereler iptal edildi. İstanbul Teknik Üniversitesi Nükleer Enerji Enstitüsü'nde 250 kW gücünde TRIGA Mark II reaktörü işletmeye alındı. Araştırma ve eğitim faaliyetlerinde kullanılmaya başlandı.
1980'ler	İkinci araştırma reaktörü olan TR-2, 5 MW nominal güç ile kritik seviyesine ulaştı. Türkiye Cumhuriyeti hükümeti, General Electric (GE)-ABD şirketinin Akkuyu'da iki reaktör (665 MW ve 990 MW), Siemens&Kraft Werk Union (KWU) ve Atomic Energy Canada Ltd. (AECL)-Kanada, Alman şirketlerinin Sinop'ta birer reaktör (1185 MW); kuracağını açıkladı. Sinop'ta sonradan yapılan deprem incelemeleri sonucu, ilk yatırım maliyetinin artmasına ve projenin durmasına sebep oldu. Türkiye Cumhuriyeti hükümeti Akkuyu nükleer güç santrali proje işleyişini anahtar teslimden yap-işlet-devret işleyişine çevirdikten sonra, Siemens KWU müzakerelerden geri çekildi. 1987'ye kadar AECL ile müzakereler sürdürüldü ancak siyasi etkenler ve kredi garantisi olmaması sebepleriyle müzakereler iptal edildi.

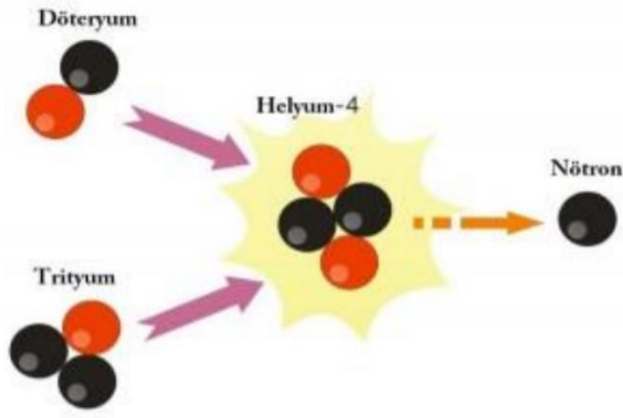
Tablo 2. (Devamı)

YIL	TARİHÇE
1980	Nükleer enerjiye karşı olumsuz yaklaşımlar Çernobil kazası sebebiyle arttı . Yapılan analiz sonuçları, Ülkemizin enerji kaynaklarını arttıramadığı durumda ilerleyen yıllarda enerji krizine neden olacağını gösterdi. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı'nın gerçekleştirdiği çalışmalar ile 2010 yılında 3100 MWe ve 2030 yılında 15000 MWe nükleer enerjiye gereksinim duyulacağını belirtti.
1990'lar	Yapılan açıklamaların, ülkede nükleer enerjinin önemini artırması ile gündemi oluşturdu. Bakanlık tarafından teklif talebi sunuldu. Akkuyu NGS tekrar ihaleye çıktı. AECL, NPI (Nuclear Power International/Siemens ve Framatome konsorsiyumu) ve Westinghouse (Mitsubishi ile ortak) tekliflerini sundular. Teklifler sırasıyla 665 MWe kapasiteli iki PWR, 1482 MWe kapasiteli bir PWR ve 1218 MWe kapasiteli bir PWR oldu. Türkiye Cumhuriyeti hükümeti kararını birkaç kez erteledi ve ekonomik şartlar sebebiyle planlardan vazgeçildi.

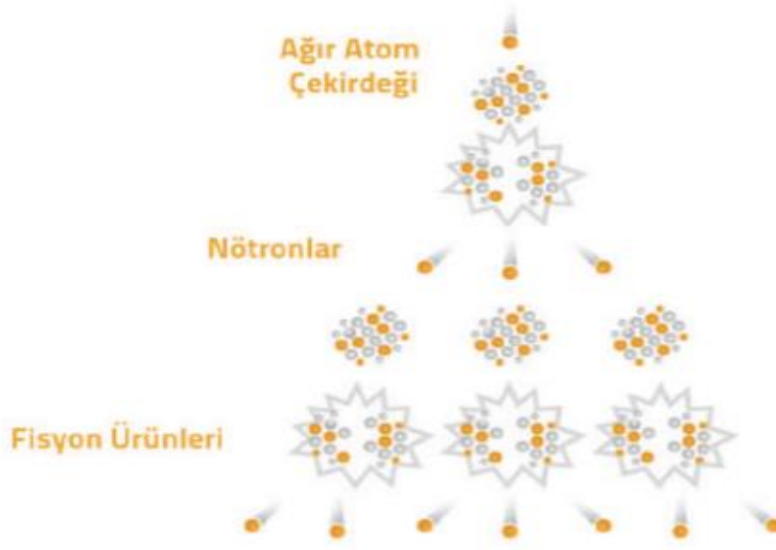
Nükleer enerji, iki farklı tepkime türü ile elde edilebilmektedir. Bunlardan ilki fisyon tepkimesi yani ağır kütleli bir çekirdeğin nötron ve gama yayımı ile orijinal kütesinden daha (çok nadir olarak daha büyük kütleli) küçük kütleli parçalara bölünmesi olayıdır. Uranyum madeni gibi bazı ağır çekirdekler nötronlarla bombardımanı sonucunda birbirinden tamamen farklı ve yeni iki adet çekirdeğin oluştuğu, yani ayrışmanın meydana geldiği görülmektedir. Meydana gelen çekirdeklerin birbirinden hızla ayrılması esnasında diğer çekirdeklere çarpmasıyla meydana gelen ısı enerjisi ile enerji üretimi gerçekleşmiş olur. Tipik bir fisyon reaksiyon örneği Şekil 5'te gösterilmektedir. İkicisi ise füzyon adı verilen tepkime; fisyon tepkimesinin aksine, ağır atom çekirdeklerine yüksek enerji verilmesiyle çekirdeklerin etkileşmeni sağlayan olaydır. Tipik bir füzyon reaksiyon örneği Şekil 6'da gösterilmektedir. Örneğin; Güneş patlamaları füzyon tepkime iken, atom bombası, nükleer santral teknolojileri ise fisyon tepkimelerine örnek gösterilebilir.



Şekil 5. Tipik bir fisyon reaksiyonu (URL-3, 2017).



Şekil 6. Tipik bir füzyon reaksiyonu (Öngü, 2014).



Şekil 7. Zincirleme reaksiyon mekanizması (URL-4, 2022).

Fisyon tepkimeleri sonucunda ise iki ya da üç nötron meydana gelir. Tepkime sonucu meydana gelen bu nötronlar, atom çekirdeklerinin bölünmesini devam ettirir. Atom çekirdeklerinin sürekli bölünmesiyle devamlı olarak ısı enerjisi üretilmiş olur. Bu işlem tekrarlayarak devam eder. Tekrarlayarak devam eden bu işleme ise zincirleme reaksiyon denir (Şekil 7). Çekirdek bölünmeleri zincirleme reaksiyon olarak başlatılan, kontrollü şekilde sürdürülmesi şeklinde düzenlenen ve enerji üretimine uygun tasarlanan sistemlere nükleer reaktör denilmektedir.

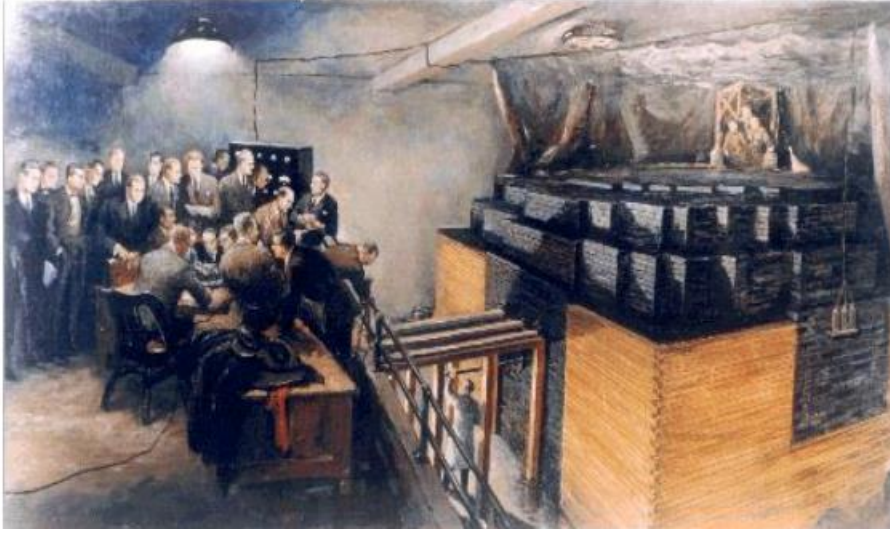
2.3. Nükleer Reaktörler

2.3.1. Nükleer Reaktörlerin Temel Bileşenleri

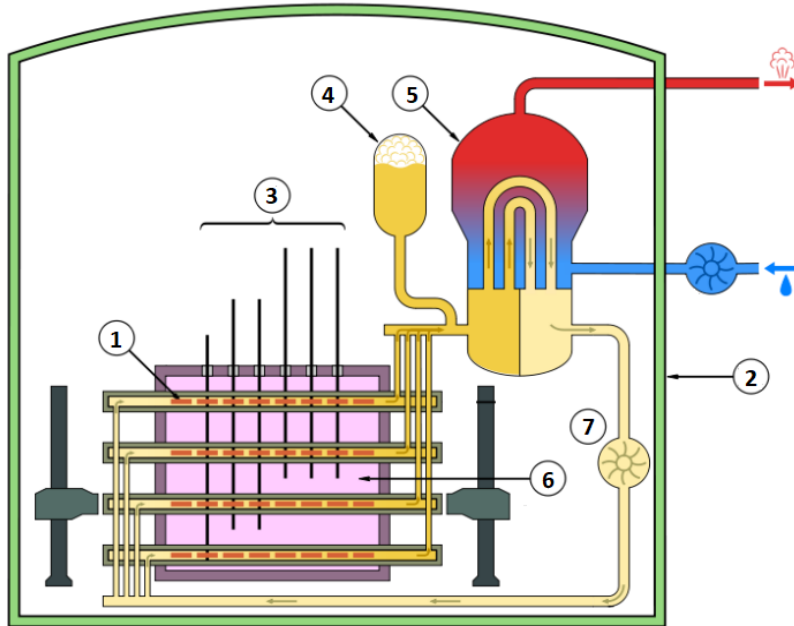
Nükleer enerjinin elektrik enerjisine dönüştürülmesini sağlayan sistemlerdir. Fisyon tepkimesi sonucu meydana gelen nükleer enerji, farklı malzemeler ile nükleer

yakıt yardımıyla birleşince ısı enerjisine dönüşür. Meydana gelen ısı enerjisi ise bir soğutucu aracılığı ile bazı sistemlerde doğrudan, bazı sistemlerde ise ısı enerjisini başka bir taşıyıcı ortama ileterek türbin sisteminde kinetik enerjiye, jenertör sisteminde ise elektrik enerjisine dönüştürülür (URL-5, 2011). İlk nükleer reaktör, 1942 yılında Amerika Birleşik Devletleri'nin Chicago, Illinois kentinde İtalyan Enrico Fermi tarafından yer altında inşa edilmiştir (Şekil 8).

Nükleer reaktörler yedi adet bileşenden oluşmaktadır (Şekil 9). Bu bileşenleri oluşturan malzemeler ve işlevlerine ilişkin açıklamalar Tablo 3'te sunulmuştur.



Şekil 8. Yer altında inşa edilen nükleer deneme reaktörü (Öngü, 2014).



Şekil 9. Reaktörü oluşturan temel bileşenler (Öngü, 2014).

1. Reaktör Kuru
2. Reaktör Koruma Kabı
3. Kontrol Çubukları
4. Basınçlandırıcı
5. Buhar Üreteci
6. Yavaşlatıcı (Moderatör)
7. Reaktör Soğutma Pompaları

Tablo 3. Bir reaktörü oluşturan bileşenlerin malzemeleri ve işlevleri (Turanlı Orakçı, 2012).

Bileşen	Malzeme	İşlev
Yakıt	$^{233}_{92}\text{U}$, $^{235}_{92}\text{U}$, $^{239}_{94}\text{Pu}$, $^{241}_{94}\text{Pu}$	Fisyon reaksiyonu
Yavaşlatıcı (Moderatör)	Ağır su, Hafif su, ağır su, berilyum ve karbon	Hızlı nötronların enerjisini düşürerek optimum düzey yani termal nötronların enerji seviyesini sağlamak
Soğutucu	Ağır su, hava, karbondioksit, hafif su, helyum, bizmut, sodyum, sodyum potasyum ve organikler	Isıyı ortamdan uzaklaştırmak
Yansıtıcı	Ağır su, Hafif su, ağır su, berilyum ve karbon	Nötron kaçacağını en az seviyeye indirmek
Reaktör Koruma Kabı	Beton, polietilen, su, kurşun ve çelik	Nükleer reaksiyon esnasında açığa çıkan radyasyonu absorbe ederek koruma sağlamak
Kontrol Çubukları	Hafniyum, Kadmium ve bor	Reaktör içerisinde kontrolsüz güç artışını engellemek amacıyla nötronların artış hızını dengelemek, kontrol altına almak.
Yapı	Zirkonyum, paslanmaz çelik, Alüminyum, çelik	Reaktör bileşenlerine destek sağlamak ve yakıt elemanlarını korumak.

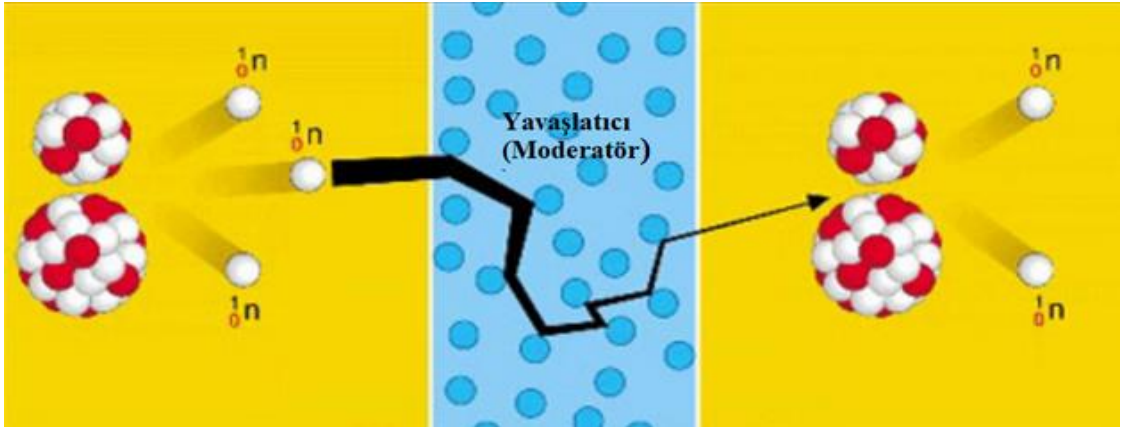
• Yakıt; Bir nükleer reaktörün en temel bileşenlerin birisi yakıttır. Çekirdek kısmında fisyon tepkimesi yapabilen yakıt bulunmaktadır. Genellikle en çok kullanılan yakıt uranyumdur. UO_2 olarak bulunur. %2 - 4 oranında U^{235} ile zenginleştirilir. Yakıt, zirkonyum alaşımları içerisinde bulundurulur. Zirkonyum alaşımlarını içeren metal

tüpler de yakıt çubuğu denilen bileşeni oluşturur. Yakıt çubukları fisyon tepkimesine hazır şekilde reaktör korundaki yakıt demetine yerleştirilir. Şekil 10’da metal tüpler içerisinde bulunan nükleer yakıt demeti gösterilmektedir (Öngü, 2014).



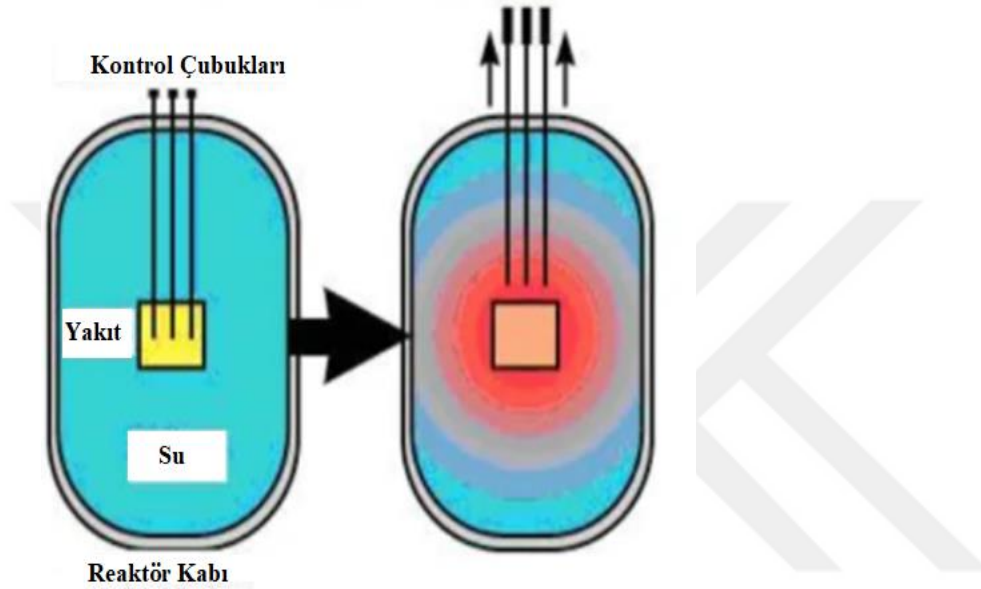
Şekil 10. Nükleer yakıt demeti (URL-6, 2021).

- Yavaşlatıcı (moderatör); Reaktör içerisinde gerçekleşen fisyon tepkimesi sonucu kinetik enerjisi yüksek olan nötronların hızını optimum seviyeye düşürerek termal nötronlar seviyesine getiren ve daha fazla tepkime oluşmasını sağlayan ortamdır. Genellikle su yavaşlatıcı olarak kullanılır. Ağır su ya da grafit kullanıldığı da olabilir. Şekil 11’de yavaşlatıcı (moderatör) görseli yer almaktadır.



Şekil 11. Yavaşlatıcı (Moderatör) (URL-7, 2021).

• Kontrol Çubukları; Hafniyum, bor, indiyum, gümüş ya da kadmiyum gibi nötronları absorbe eden yapılardan oluşur. Bu çubuklar, nötron tutucu materyal içermektedir. Nükleer reaktörlerde, fisyon tepkimeleriyle gerçekleşen zincirleme reaksiyonu kontrol etmek ya da durdurmak oldukça zor ve önemlidir. Kontrol ve durdurma işlemi kontrol çubukları ile gerçekleştirilir. Reaktör kuru içerisine zincirleme reaksiyonu durdurmak ya da kontrol etmek için sokulup, çıkarılmasıyla kontrol ya da durdurma işlemi gerçekleştirilir (Şekil 12).



Şekil 12. Kontrol çubukları (URL-8, 2021).

• Basınçlandırıcı; Soğutma sıvısının (su) kaynamasına engel olarak sürekli sıvı halini korumasını sağlamak amacıyla kullanılan basınçlı su reaktörünün bileşenidir.

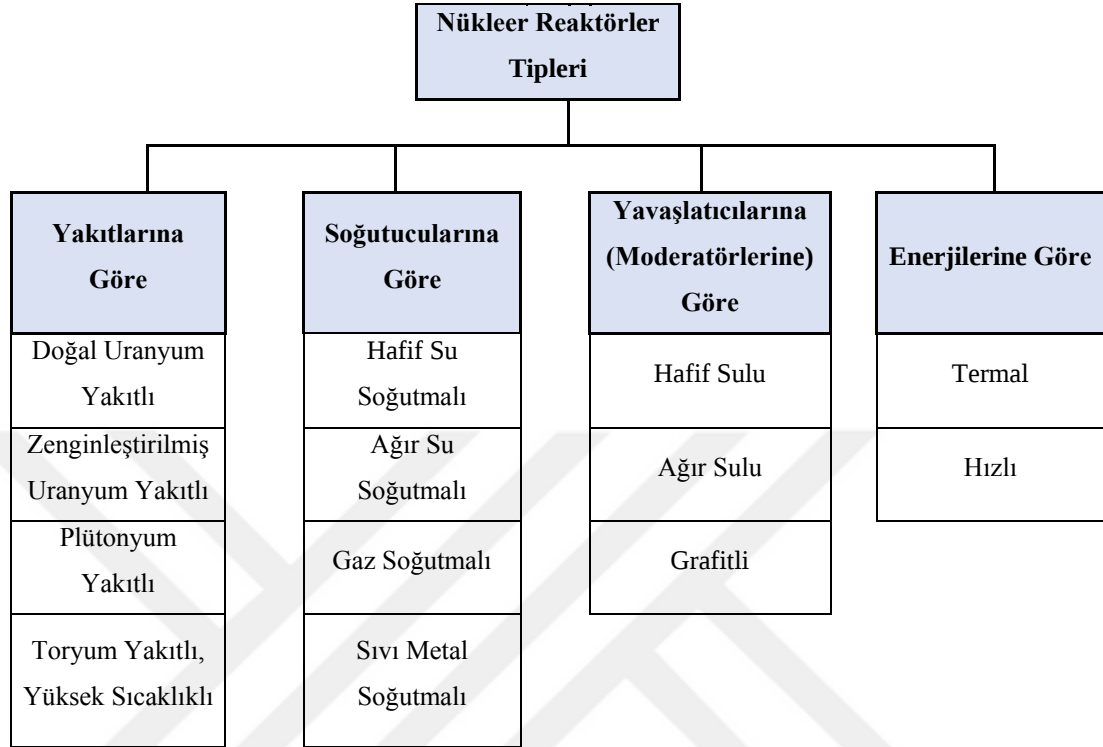
• Buhar Üretici ; Reaktör kuru içerisinde ısı aracılığıyla üretilen besleme suyunun buhara dönüştürülmesi için kullanılan ısı değişiricileridir.

• Reaktör Soğutma Pompaları; Yüksek basınç altında soğutma suyunun basınçlandırılmasını sağlar. Daha sonra reaktör soğutma sisteminde dolaşımı sağlayarak ısının reaktör korlarından buhar üreticine aktarılmasını sağlar (URL-3, 2017).

• Reaktör Koruma Kabı; Dikey ve silindirik şekilde monte edilen, çekirdeği güvenilir şekilde barındıran ve bol miktarda zararlı radyasyon içeren nükleer enerji santralinin bir bileşenidir. Reaktör soğutma sisteminin en önemli noktasıdır (URL-9, 2022).

2.3.2. Nükleer Reaktör Tipleri

Nükleer reaktörler; yavaşlatıcı (moderatör), soğutucu, yakıt ve enerji özelliklerine göre sınıflandırılabilirler. Şekil 13'te Nükleer reaktör tipleri gösterilmiştir.



Şekil 13. Nükleer reaktör tipleri (Öngü, 2014).

Kullanılan soğutucu özelliğine göre sınıflandırma yöntemi en sık kullanılan yöntemdir. Dünyada kullanılmakta olan ticari reaktörlerin yaklaşık %82'si yavaşlatıcı ve soğutucu olarak normal su ile çalışan reaktörlerden oluşmaktadır. Nükleer Enerji Santralleri'nde, nükleer enerjinin ham maddesi, U-235 izotopu içeren saflık oranı % 1'den daha olan uranyum madeninden çıkartılmaktadır. Bu işlemin ardından, zincirleme reaksiyonunu devam ettiren U-235 konsantrasyonunun saflık oranını %1'den %4'e artırmak için madenin bileşimi olan U-235 izotopunun zenginleştirme işlemi yapılmaktadır (URL-10, 2021).

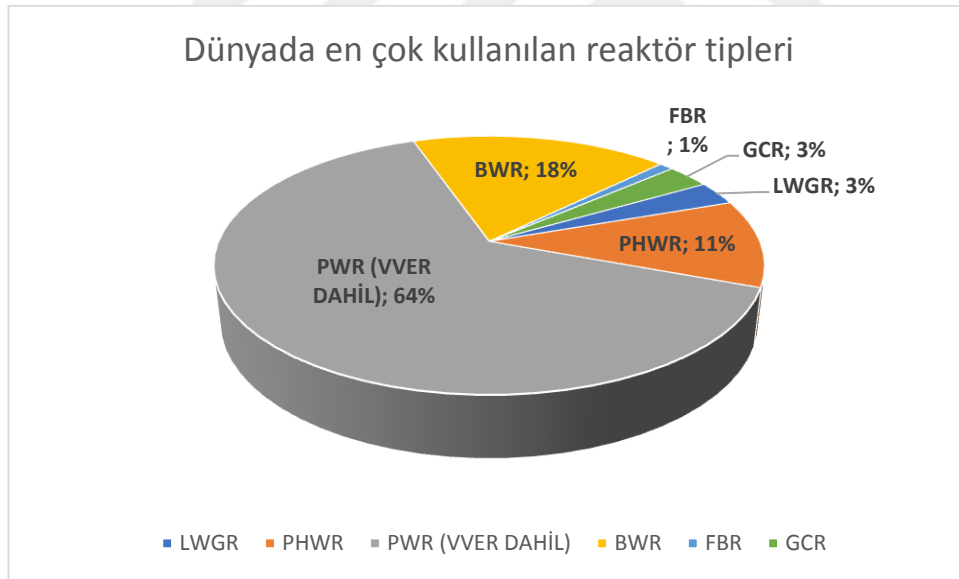
%2 - 4 oranında zenginleştirilen uranyum yakıt, nükleer reaktörde reaksiyona girmektedir ve tepkime sonucu açığa çıkan soğutucu, yavaşlatıcı olarak kullanılmaktadır. Bu özellikte kullanılan su hafif su olarak adlandırılmaktadır (Karataşlı, 2016). Hafif suyun soğutucu ve aynı zamanda yavaşlatıcı olarak kullanıldığı bu tipteki reaktörler dünyanın en güvenli reaktörleri arasında yer almaktadır. Bu prensipte çalışan reaktör tiplerine ise hafif sulu reaktörler (Light Water Reactor, LWR) denir.

Rus üretimi olan VVER (Voda-Vodyanoi Energetichesky Reaktor) reaktörü ile kaynar sulu reaktörleri içeren (Boiling Water Reactor, BWR), basınçlı su reaktörleri (Pressurized Water Reactor, PWR) olmak üzere iki tip şeklinde sınıflandırılmışlardır. %18 oranında geriye kalan reaktör tipleri ise gaz soğutmalı reaktör (Gas Cooled Reactor, GCR), grafit yavaşlatıcılı su soğutmalı (Light Water Graphite Reactor, LWGR/RBMK), basınçlı ağır su (Pressurized Heavy Water Reactor, PHWR), hızlı üreten reaktörlerdir (Fast Breeding Reactor, FBR).

Dünyada toplam 376 GWe kurulu güce sahip 438 adet nükleer reaktör işletilmektedir. En çok kullanılan reaktör tipi basınçlı su reaktörleridir (Pressurized Water Reactor, PWR) (Şekil 14).

Dünya’da en çok kullanılan nükleer reaktör tipleri sırasıyla;

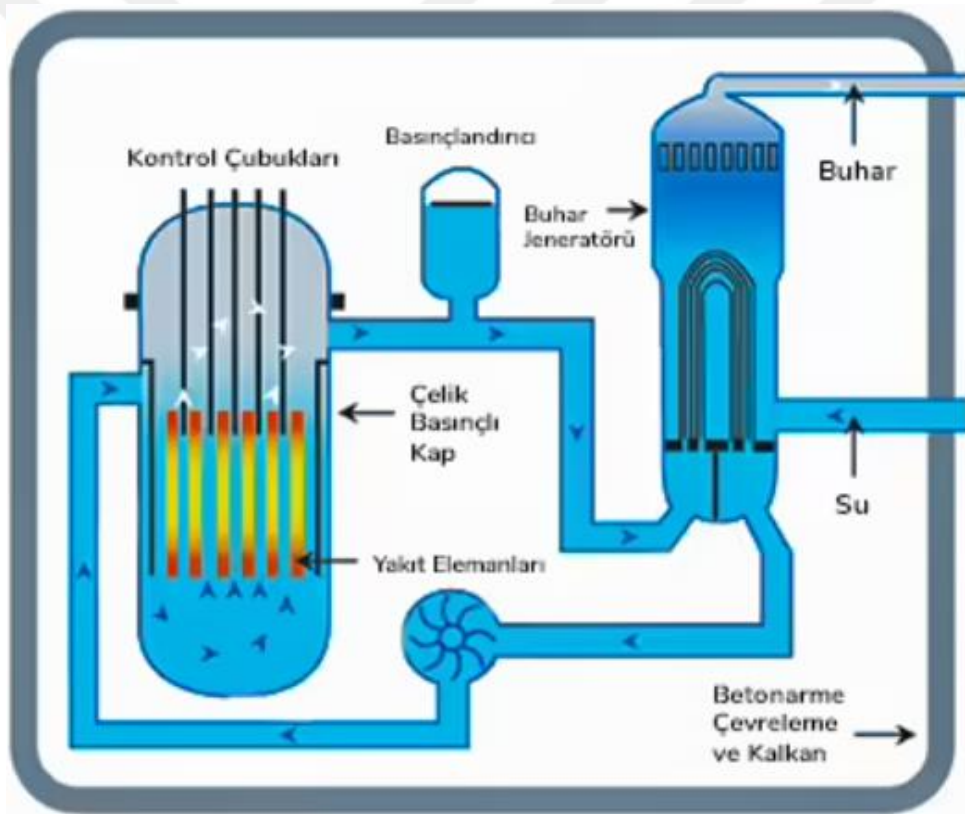
- Basınçlı Su Reaktörleri (Pressurized Water Reactor, PWR)
- Kaynar Sulu Reaktörler (Boiling Water Reactor, BWR)
- Basınçlı Ağır Su Reaktörleri (Pressurized Heavy Water Reactor, PHWR) (URL-3, 2017).



Şekil 14. Dünya’da en çok kullanılan reaktör tipleri (Terzi, 2016).

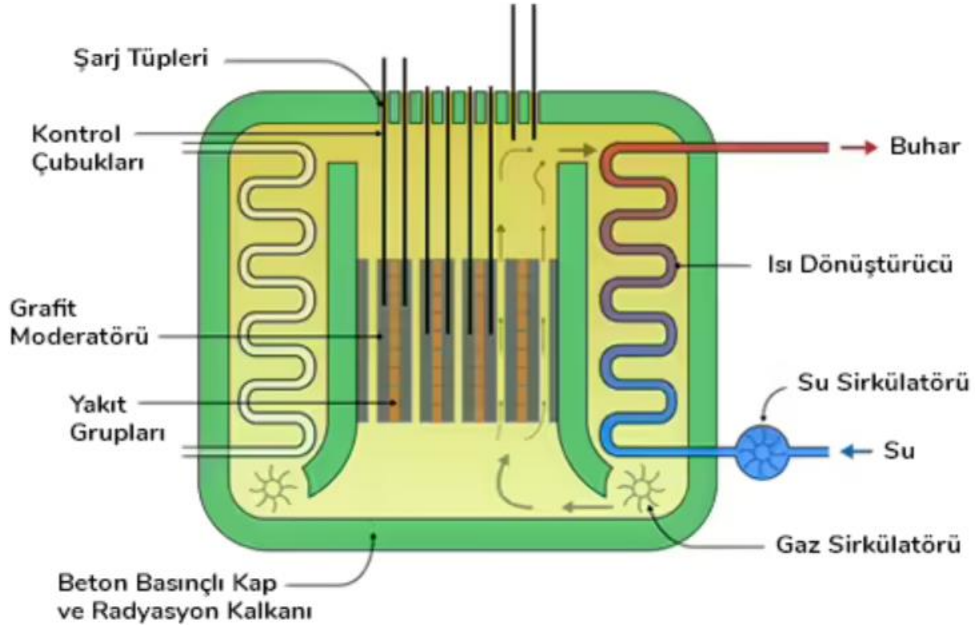
Basınçlı Su Reaktörleri (Pressurized Water Reactor, PWR): Ticari amaçlı kullanılan reaktörler arasında en yaygın kullanılan reaktör tipidir. Dünya’da toplam 438 adet aktif çalışan reaktörden yaklaşık 277 tanesinde kullanılan reaktör tipi basınçlı su reaktörüdür (Pressurized Water Reactor, PWR). Batı ülkelerinde kullanılan VVER (Voda-Vodyanoi Energetichesky Reaktor) ya da WWER (hafif su yavaşlatıcılı ve soğutmalı güç reaktörü) basınçlı su reaktörleri, Rus üretimi reaktörlerdir. Basınçlı

reaktörlerin yaklaşık %19'unu VVER tipi reaktörler oluşturmaktadır. Basınçlı su reaktörlerinde soğutucu ve yavaşlatıcı olarak hafif su (H_2O) kullanılmaktadır. U^{235} ile yaklaşık %3 oranında zenginleştirilmiş uranyum madenini yakıt olarak kullanan reaktörde, suyun yüksek sıcaklıklarda sıvı olarak muhafaza edilebilmesi için su yüksek basınç (15.5 MPa=155 bar) altında tutulur. Kaynama noktası yüksek basınç altında yükseldiğinden dolayı, reaksiyon ısısı aynı basınçta sıvı su ile yüksek sıcaklıkta (300 °C – 320 °C) buhar üreticine taşınır. Buhar üreticini ve reaksiyon kabını içeren soğutucu, birinci devrede kuvvetli pompalar yardımı ile dolaştırılır. Soğutucu ısısı ikinci devreye iletilir. Buhar üreticinde bulunan suyun dolaşan soğutucu su yardımı ile kaynaması sonucu üretilen buhar türbinin dönmesini sağlar ardından jeneratör vasıtasıyla elektrik üretimi gerçekleşir (Şekil 15) (Terzi, 2016).



Şekil 15. Basınçlı su reaktörleri (URL-3, 2017).

Kaynar Sulu Reaktörler (Boiling Water Reactor, BWR): Kaynar sulu reaktörler (Boiling Water Reactor, BWR), basınçlı su reaktörlerinden sonra en çok tercih edilen reaktör tipidir. Dünya’da kurulu ve aktif çalışan 438 adet reaktörden, 80 adedi kaynar sulu reaktördür. Kaynar sulu reaktörlerde yaklaşık 750 adet yakıt demeti, bir yakıt demetinde ise yaklaşık 90 - 100 adet yakıt çubuğu bulunmaktadır. Bu reaktör tiplerinde uranyum miktarı yaklaşık 140 tondur. Basınçlı su reaktörlerinden en belirgin farkı,



Şekil 18. Gelişmiş gaz soğutmalı reaktör (Advanced Gas Cooled Reactor) (URL-11, 2019).

VVER nükleer güç reaktörü : VVER (Voda-Vodyanoi Energetichesky Reaktor) veya WVER (Su soğutmalı ve Su Moderatörlü Güç Reaktörü) Batı ülkelerinde kullanılan basınçlı su reaktörleri'nin (PWR'ler) Rus üretimidir. Şekil 19'da VVER reaktörlerinin şematik gösterimi yer almaktadır. Bu reaktörlerde, PWR'lar da buhar üreteçleri dik konumda iken VVER'lerde buhar üreteçleri yatay konumdadır. Bu durum PWR'lar ile VVER'ler arasındaki en önemli ve belirgin fark olarak bilinir.

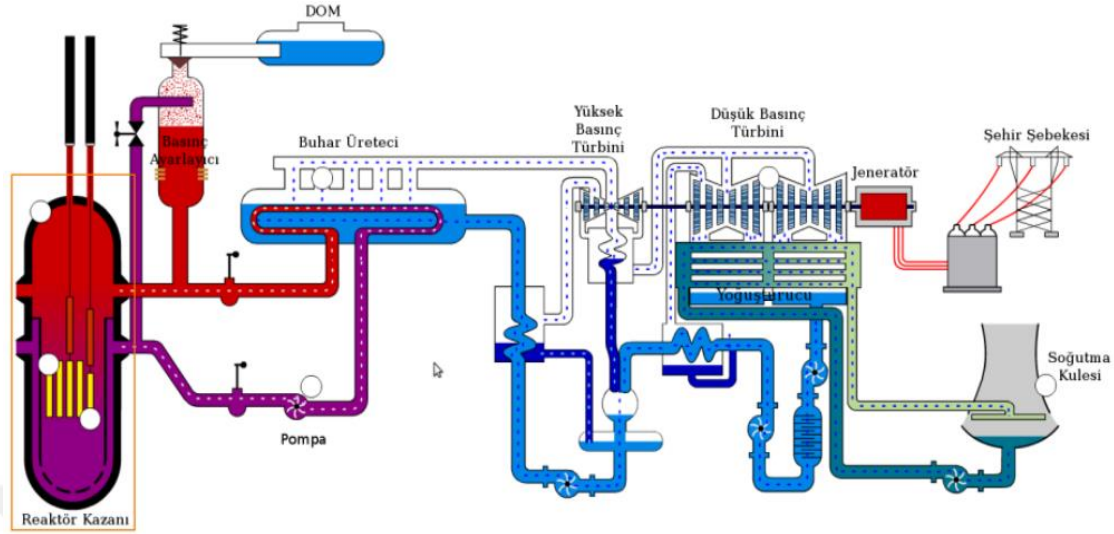
VVER'in başlıca 3 tane standartlaştırılmış tasarımı bulunmaktadır. Birincisi ilk nesil olarak bilinen 440–230 MW, ikincisi ikinci nesil olarak bilinen 440 – 213 MW ve son olarak üçüncü nesil olarak bilinen 1000 MW güç çıkışlı tasarımlardır.

İlk nesil olan VVER–440 V230 serisinin sadece sınırlı acil durum su enjeksiyon sistemleri bulunmaktadır. Koruma kabı bulunmadığı için kapalı sistem değildir. Kullanımı devam eden VVER-440/230 tasarım birinci nesil reaktörler kullanılmaktadır.

İkinci nesil olarak bilinen VVER-440/213 reaktör tasarımı 1970'li yıllarda geliştirilmiştir. Birinci nesil reaktör tasarımı üzerinde iyileştirmeler yapılmış olup, koruma kabuğu ve güvenlik akışına dair sistem açıkları giderilmiştir.

En son nesil olarak bilinen üçüncü nesil VVER-1000 reaktör tasarımı ise 1975–1985 yılları arasında geliştirilmiştir. Bu reaktör tasarımının çoğu özelliği batı tasarımı olarak bilinen PWR'ların özellikleri ile benzerdir. Üçüncü nesil VVER-1000 reaktör tasarımının diğer tasarımlardan farkı ve gelişmiş özelliği çelikle güçlendirilmiş koruma kabuğunun bulunmasıdır. VVER-1000 tasarım reaktörlerden dünyada yaklaşık 26 ünite

bulunmaktadır. VVER-1000 tasarım reaktörler teknik olarak III. Nesil (ve 3+) olarak ifade edilmektedir (Terzi, 2016).



Şekil 19. VVER-1000 Reaktörün şematik gösterimi (Öngü, 2014).

VVER-1200 reaktörü : VVER-1200 (AES-2006) reaktörler, VVER-1000 tasarım reaktörlerlerinin sistem açıklarının giderilmiş ve aynı zamanda gelişmiş versiyonlarıdır. Sovyet dizaynı olan suyu soğutucu ve yavaşlatıcı olarak kullanan reaktörler VVER (Vodo-Vodianoy Energeticheskiy Reactor); Rusya tarafından geliştirilen basınçlı su reaktörlerinin (PWR) çeşididir. VVER reaktörlerinin açılımı Water-cooled Water-moderated Power Reactor reaktörün tipini, 1200 ise MWe olarak gücünü ifade etmektedir. Teknik iyileşmeler ve maliyet bakımından performans özellikleriyle ön plana çıkan reaktörlerdir. Aktif olarak kullanılan VVER-1000 tipi reaktörlerin termal verimi (%36), mevcut işletme ömrü (+60 yıl), gücü ve güvenlik özellikleri artırılmış modelleridir. VVER-1200 reaktörüne ait teknik özellikler Tablo 4’te sunulmuştur. Bu tip reaktörler yavaşlatıcı ve soğutucu olarak hafif su kullanır. Standartlaştırılmış ve III+ nesil bir nükleer enerji santrali kurulumu amacıyla tasarlanmışlardır (Terzi, 2016). Nükleer reaktörler arasında yer alan VVER-1200 Nesil-III+ bir basınçlı su reaktörüdür. VVER-1200 reaktörünün şematik gösterimi Şekil 20’de yer almaktadır. Reaktörün bulunduğu bina ise Şekil 21’de yer almaktadır. Reaktörün ana kısmında buhar üreteçlerinin yatay konumda bulunması ve yakıt demetlerinin altıgen olarak kullanılması gibi özellikleri, normal basınçlı su reaktörlerinden farklı özelliğidir. Reaktör ünitesinde her biri 312 adet UO_2 yakıt çubuğundan oluşan ve altıgen şeklinde toplamda 163 adet yakıt demeti bulunmaktadır. VVER-1200 yakıt demeti Şekil 22’ de gösterilmiştir (Bulut Acar, 2020). Ülkemizin ilk Nükleer Güç Santrali olan Akkuyu

Nükleer Güç Santralinde kullanılan 4 adet VVER 1200 nükleer reaktörlerin yapımı 2016 yılının sonunda başlamış olup 2025 yılında tamamlanması öngörülmektedir (Tablo 5).



Şekil 20. VVER-1200 Reaktörün şematik gösterimi (URL-12, 2004).



Şekil 21. VVER-1200 (AES 2006) reaktörünün bulunduğu bina (URL-13, 2022).

Tablo 4. VVER-1200 teknik özellikler (Polatoğlu, 2016).

VVER1200 (AES-2006) Özellikler	
İşletme Ömrü	+60 yıl
Termal Verimlilik	%36
Kurulu Güç	1200 MW
Yakıt Demetleri	Altıgen tasarlanmıştır.
Yakıt Zenginleştirme oranı	%4.85
Kapasite faktörü	%90
Bir Reaktörün İçindeki Yakıt Demeti Sayısı	163
Maks. Yanma (burn-up)	64 MW*Gün/kgU
Ortalama Yanma (burnup)	46.7 MW*Gün/kgU
Yakıt çevrimi	12 ay- 18 ay (optimum) – 24 ay (düşük verim)
Primer Kontrolde Ünitadaki Güç Değişimi	$\pm$ %5
Primer Kontrolde Güç Değişim Hızı	%1 nom/s
Sekonder Kontrolde Güç Değişimi	$\pm$ %10
Yakıt Demetinde Bulunan Yakıt Kütlesi	530 kg
Su Giriş/Çıkış Sıcaklıkları	298/329 °C

Tablo 5. Ülkemizde kurulumu planlanan güç santrali kurulum ve işletim aşamaları (Polatoğlu, 2016).

Reaktör Adı	Reaktör tipi	Güç	Başlangıç Tarihi	İşletim Tarihi
Mersin-Akkuyu 1. Reaktör	VVER-1200	1200	2016 sonu	2023
Mersin-Akkuyu 2. Reaktör	VVER-1200	1200	2017	2023
Mersin-Akkuyu 3. Reaktör	VVER-1200	1200	2018	2024
Mersin-Akkuyu 4. Reaktör	VVER-1200	1200	2019	2025



Şekil 22. VVER-1200 yakıt demeti (Acar, 2020).

2.4. Nükleer Güç Santralleri

Dünya'nın elektrik ihtiyacının yaklaşık %11'ini karşılayan ve ileri teknoloji ürünü olan Nükleer güç santrallerinin elektrik üretim faaliyeti 1950'li yıllarda başladı (URL-3, 2017). Dünyada 31 ülkede ticari olarak işletilmektedir. Dünya genelinde ise yaklaşık 440 adet nükleer enerji santrali bulunmaktadır. Nükleer santraller sadece elektrik üretmekle sınırlı kalmayıp aynı zamanda tıp, sanayi ve tarım sektöründe de uygulama alanı olan ve önemli ölçüde istihdam imkânları sunan ticari tesislerdir. Nükleer Güç Santralleri hidroelektrik ve kömür yakıtlı santrallerden farklı olarak teknik bakımdan her yere kurulabilirler. Nükleer güç santrallerinde elektriğin üretim maliyeti yaklaşık 1-3 cent arasında değişmektedir (Karagöz, 2020). Elektrik üretim maliyetinin düşük olması amaçlandığından santrallerin kurulum alanlarının bazı kriterlere göre araştırılması gerekir. Bu kriterler için araştırmalar Tablo 6'da sunulmuştur.

Tablo 6. Bir Nükleer güç santralin kurulması gereken yerde yapılan araştırmalar (URL-6, 2021).

Santralin kurulması gereken yerde yapılan araştırmalar	
Deprem Riski	Nükleer santrallerde yapım maliyetini minimum seviyede tutmak için, deprem riski analiz edilir ve en düşük risk seviyesine sahip alanlar seçilir. Ülkemizde Akkuyu yöresi yapılan araştırmalar sonucu, Türkiye'nin en güvenli bölgesi olarak belirlenmiştir.
Taşıma koşulları	Nükleer santrallerin, ton bazında oldukça ağır ekipmanları bulunmaktadır. Bu ekipmanların, santralin kurulacağı alana taşınması önemli bir sorundur. Kara ve demir yolu taşımacılığı ya da akarsu ile taşıma ekipmanların taşınmasında uygun yöntem değildir. Deniz taşımacılığı en makul yöntemdir. Nükleer santrallerin deniz kenarında kurulması ekipmanların taşınmasında maliyet bazında büyük yarar sağlar.
Soğutma gereksinimi	Üretilen ısıyı alabilmek için soğutucuya ihtiyaç duyulur. Soğutma suyu akarsu veya denizden sağlanır. Debisi yeterli miktarda akarsu ya da deniz kenarlarına kurulması soğutma suyunun elde edilmesinde kolaylık sağlayacaktır.
Meteorolojik koşullar	Yöreye hâkim hava olayları, radyolojik etkilerin en aza indirilmesi ve sağlanan güvenliğin korunması açısından önemlidir. 1972 yılında ise dört yıl boyunca devam eden meteorolojik, jeolojik ve biyolojik araştırmalar sonucunda bu alana Türkiye Atom Enerjisi Kurumu (TAEK) tarafından yer lisansı verilmiştir. Ülkemizde Akkuyu yöresi yapılan araştırmalar sonucu belirtilen tüm özelliklere sahip olduğu için tercih edilmiştir.

2.4.1. Nükleer Güç Santralleri Çalışma Prensibi ve Çevrim Özellikleri

Nükleer Güç Santrallerinde, reaktör ana kısmında ana madde olarak kullanılan uranyum, yakıt çubukları, yavaşlatıcı olarak kullanılan sıvı ve zincirleme reaksiyonu kontrol eden kontrol çubukları bulunur. Nükleer santrallerde plütonyum, uranyum ve toryum atomlarının kontrollü olarak parçalanması ile zincirleme reaksiyon başlatılır. Fisyon (atomun iki veya daha fazla çekirdeğe bölünmesi) tepkimesine giren uranyum, tepkime sonucu yüksek miktarda ısı enerjisi meydana getirir. Reaktörde meydana gelen ısı, ısı iletici (basınçlı karbondioksit) yardımıyla ısı değiştiriciye (eşanjör) iletilir. Burada ısıtılan su buhar hâline dönüştürülerek türbine gönderilir. Basınçlı su reaktörlerinde ise zenginleştirilmiş uranyum yakıt, moderatör ve soğutucu olarak ağır su kullanılır. Reaktörün ana kısmında dikey çubuklar şeklinde yerleştirilen yakıt bulunur. Genellikle zirkonyumdan yapılmış su geçirmeyen yuvaların içerisinde, demet hâline getirilen uranyum çubuğu bulunur.

Reaktörün ana kısmında bulunan çubuklar su dolu bir kabın içine yerleştirilmiş şekildedir. Kabın içinde bulunan su belirli bir basınç altında kaynamayı engellenmek için tutulur. Su moleküllerinde bulunan hidrojen, nötronları yavaşlatır. Kabın üstüne bağlanmış olan birden fazla kıvrım ana devreyi oluşturur. Reaktör kabına üstteki ana devreden basınçlı su girer ve kaptan yüksek sıcaklıkta çıkar. Çıkış devresi boruları bir ısı değiştiricisinin (eşanjör) içindeki sudan geçer. Isı değiştiricisindeki su ısınarak buhara dönüşür. Bu buhar kızdırıcılardan (kurutuculardan) geçirildikten sonra buharın bir kısmı turbo alternatör türbininde genişletilir. Daha sonra buhar kondanserde soğutulur ardından buhar üretecine iletilir. Kondanser, deniz ya da akarsudan elde edilen soğuk suyla soğutulur ve gerekirse bu suda soğutma kulelerinde ayrıca soğutulur. Nükleer santrallerde soğutma ihtiyacı çok fazla olduğundan debisi yüksek akarsu ya da deniz kenarında kurulmuş olması önemli ve faydalıdır. Şekil 23'te nükleer reaktörlerin çalışma prensibi gösterilmiştir. Şekil 24'te ise nükleer güç santralinin bileşenleri yer almaktadır.

amacıyla geliştirilen ve elektrik üretiminde dünya en fazla kullanılmakta olan çevrime Clausius-Rankine çevrimi denir.

İdeal rankine çevrimi, dört temel aşamadan oluşmaktadır. Bu aşamalar kullanılan akışkanın hal değişimlerini ifade etmektedir.

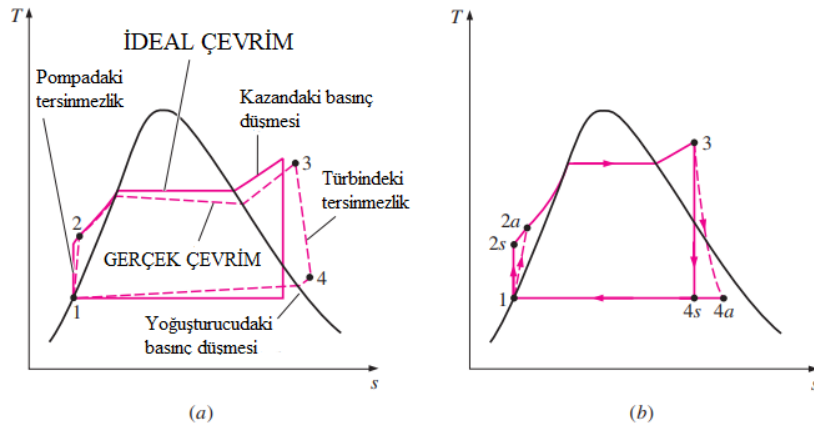
- 1-2 Pompada sıkıştırma gerçekleşir. Düşük basınçtan yüksek basınca doğru pompalama olur. Bu noktalar arasında pompa işi girişine ihtiyaç duyulur.

- 2-3 Kazanda, sabit basınçta sisteme ısı geçişi gerçekleşir. Isı kaynağı olarak nükleer güç, doğal gaz ve kömür kullanılır.

- 3-4 Türbinde genişleme gerçekleşir. Bu durum basınç ve sıcaklık kaybına sebep olur.

- 4-1 Yoğuşturucu ile sistemden sabit basınçta ısı atılması,

Gerçek buharlı güç çevriminin ideal rankine çevriminden farkı, pompa ve türbindeki tersinmezliklerin ideal rankine çevrimi üzerindeki etkisinin T-S diyagramı Şekil 25'te verilmiştir (Çengel ve Boles, 2008).



Şekil 25. (a) Gerçek buharlı güç çevriminin ideal rankine çevriminden farklılığı. (b) Pompa ve türbindeki tersinmezliklerin ideal rankine çevrimi üzerindeki etkisi. (Çengel ve Boles, 2008).

2a ve 4a indisleri sırasıyla pompa ve türbinin gerçek çıkış hallerini, 2s ve 4s indisleri ise sırasıyla izantropik çıkış hallerini ifade etmektedir (Şekil 25 (b)).

2.4.2. Akkuyu Nükleer Güç Santralinin Tanıtımı ve Gelişimi

Akkuyu Nükleer Güç Santrali, Rusya Federasyonu ve Türkiye Cumhuriyeti arasında imzalanan en büyük ortak projedir. Ülkemizin ilk nükleer santrali olma özelliğine sahiptir. Akdeniz bölgesinde kıyı kesiminde bulunan Mersin ili Gülnar

ilçesine bağlı, Büyükeceli Akkuyu mevkiinde kurulumu yapılacaktır. Kurulum alanı kara ve denizi kapsamaktadır. Şekil 26'da Akkuyu Nükleer Güç Santrali Projesi yer almaktadır. Akkuyu Nükleer Güç Santrali'nin Akkuyu NGS için mevzuat veri tabanı, 2012 yılının Kasım ayında TAEK (Türkiye Atom Enerjisi Kurulu) tarafından kabul edilmiştir. NGS Projesi ile ilgili Mersin'de Bilgilendirme Merkezi'nin açılma kararı ise 2012 yılının Aralık ayında alınmıştır. Projenin gelişiminin 2010 yılında başlamasıyla birlikte günümüze kadar yıl bazlı gelişimi Tablo 7'de sunulmuştur. Her bir reaktörü 1200 MWe olacak şekilde 4 reaktör ünitesi ile toplam 4800 MWe kurulu güce sahiptir. Reaktör tasarımı VVER-1000 III. Nesil nükleer santraldeki teknik özelliklerin iyileştirilmesi ve geliştirilmesi ile oluşturulmuştur. Proje içeriğinde Nükleer güç sistemine ek olarak, soğutma suyunu deşarj amaçlı deniz dibine yerleştirilecek dört tane boru hattı, bir tane radyoaktif atık geçici depolama alanı, iki tane malzeme yükleme boşaltma rıhtımı, üzerinde su alma kısımlarının yer aldığı dalga kıran ve işleme tesisi olacaktır. Ayrıca, tesiste çalışacak personelin konaklama alanı için, proje sahası çevresinde yaklaşık 2500 konut kapasiteli bir Yaşam Merkezi'nin kurulumu planlanmıştır (URL-15, 2020).

Akkuyu NGS'nin 35 milyar kWh güç üreteceği ve ülkemizin elektrik ihtiyacının yaklaşık %10'unu karşılaması planlanmaktadır. 6 Ekim 2010 tarihli resmi gazete açıklamasına göre, Türkiye Cumhuriyeti Devleti, Türkiye Elektrik Ticaret ve Taahhüt A.Ş. (TETAŞ) aracılığıyla üretilen elektriğin %50'sinin her bir kilovatsaatini 12.35 cent fiyatla satın alacaktır. Geriye kalan %50 oranındaki üretim miktarı Akkuyu NGS tarafından serbest piyasada satışa sunulacaktır. (URL-16, 2022). Akkuyu Nükleer A.Ş. Genel Müdürü Akhundov, nükleer santrali işletmeye alınıp üretim sağlaması halinde yıllık yaklaşık 2.5-3 milyar dolar kâr sağlayacağını açıklamıştır (URL-17, 2022).



Şekil 26. Akkuyu NGS, güç santrali projesi (Kıbaroğlu, 2018).

Tablo 7. Akkuyu NGS projesinin gelişimi (URL-18, 2022)

Yıl	Gelişimi
2010	Türkiye ve Rusya arasında, Türkiye'nin Akdeniz bölgesi kıyısında Mersin ili Gülnar ilçesinde Akkuyu mevkiinde, Akkuyu Nükleer Güç Santrali'nin kurulması için karar alındı. Anlaşma içeriğinde, 12 Mayıs tarihinde Rusya Federasyonu ve ülkemiz arasında sözleşme imzalandı. Ülkemizin ilk NGS Elektrik üretim A.Ş. projesi gerçekleştirilmek üzere 13 Aralık 2010'da tescil edildi.
2014	Akkuyu NGS'nin Çevre Etki Değerlendirme Raporu Türkiye Cumhuriyeti Çevre ve Şehircilik Bakanlığı tarafından onaylandı.
2015	Akkuyu NGS'nin deniz yapılarının temel atma töreni düzenlendi. Elektrik üretimi ön lisansı T.C. Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu (EPDK), tarafından verildi. Cengiz İnşaat A.Ş. ile santralin kurulumu ve deniz yapılarının hidroteknik tasarımına yönelik anlaşma imzalandı.
2017	TAEK (Türk Atom Enerjisi Kurumu) santrale ait tasarım parametrelerini onayladı. EPDK (Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu) tarafından 2026 yılı haziran ayına kadar geçerli elektrik üretim lisansını verildi. Santralin inşaat lisansı alınma aşamasında, TAEK'ten santral inşaatına için sınırlı izin alındı. NGS sahasında TAEK tarafından alınan sınırlı inşaat izni ile resmi inşaat temel atma töreni düzenlendi. "Nükleer adanın" güvenlik şartları ile ilgili yapılar haricinde tüm inşaat ve montaj işleri sınırlı inşaat iznine uygun yapılmaktadır.

Tablo 7. (Devamı)

Yıl	Gelişimi
2018	27 Mart'ta yürürlüğe giren Stratejik Yatırım Statüsü Kanunu uyarınca,Türkiye Cumhuriyeti'nde stratejik yatırım statüsü nisan ayında verildi. Bu statü içeriğinde, gümrük ve vergi giderlerinde bazı ayrıcalıklar tanınmasını bildirmektedir. TAEK, tarafından AKKUYU NÜKLEER A.Ş.'ye ilk güç ünitesinin inşaa edilmesi için lisans verildi. 3 Nisan tarihinde Türkiye Cumhuriyeti Cumhurbaşkanı Sn. Recep Tayyip Erdoğan ve Rusya Federasyonu Devlet Başkanı Sn. Vladimir Putin'in katılımı ile Akkuyu NGS'nin ilk güç ünitesinin temel atma töreni düzenlendi. Törenle birlikte, ilk güç ünitesinde tam kapsamlı çalışmalar resmen başlamış oldu. Ardından ikinci güç ünitesi için sınırlı çalışma izni TAEK tarafından verildi.
2019	2018 yılında verilen sınırlı izin kapsamında, ikinci güç ünitesinin inşaatında temel atma çalışmalarına resmi olarak başlandı. 2018 yılında inşaat çalışmalarına başlanılan birinci güç ünitesinin reaktör binası için temel atma çalışmaları tamamlandı. Bu çalışmanın ardından üçüncü güç ünitesi inşaat lisansı için gerekli belgeler ve bilgiler TAEK'e sunuldu. Nükleer Düzenleme Kurumu (NDK) aldığı karar ile santralin ikinci güç ünitesi için ana inşaat lisansı verildi. 2 Aralık'ta Akkuyu NGS'nin Türk iletim sistemine bağlanabilmesi için Türkiye Elektrik İletim Anonim Şirketi (TEİAŞ) arasında Abone Bağlantı Anlaşması imzalandı. Anlaşma içeriğinde, TEİAŞ'a Akkuyu NGS'nin Türk iletim şebekesine bağlanması için 6 adet yüksek gerilim hattına sahip Akkuyu NGS'ye elektrik iletim şemalarının kurulmasına ilişkin tam kapsamlı çalışmalar yürütme imkânı sunmaktadır.

Tablo 7. (Devamı)

Yıl	Gelişimi
2020	8 Nisan'da Akkuyu NGS ikinci güç ünitesinin inşası resmen başlatıldı. Reaktör binasının temel plaka temeli atıldı. Üçüncü güç ünitesinin yapım sahasında nükleer ada tesislerinin temeli için patlatma ve sondaj çalışmaları başladı. Dördüncü güç ünitesinin inşaat lisansının alınması için gerekli bilgi ve belgeler ile NDK'ya başvuru yapıldı. Birinci güç ünitesi reaktör koruma kabuğunun, ikinci katmanının montajı tamamlandı. Akkuyu NGS sahasına ikinci güç ünitesinin kor tutucu ekipmanı getirildi. birinci güç ünitesinde acil durumlarda, 9 şiddetindeki bir deprem de dahil olmak üzere santralin güvenliğini sağlayan parametrelerden biri olan kuru reaktör koruyucu inşaa edildi. İkinci güç ünitesi türbin ve reaktör binasının temel plakaları için beton dökme işlemi tamamlandı. birinci güç ünitesi için dört buhar jeneratöründen oluşan takım inşaat sahasına ulaştırıldı. Birinci güç ünitesinin en önemli ekipmanı olan, santralin işletme aşamasında nükleer yakıt koyulacak olan ve yüksek basınç altında nükleer reaksiyonun gerçekleştiği reaktör basınç kabı, 3000 kilometrelik mesafe kat ederek Akkuyu NGS inşaat sahasına ulaştırıldı. Akkuyu NGS ikinci güç ünitesinin reaktör binasında kor tutucunun kurulumuyla ilgili montaj çalışmaları tamamlandı. NDK, Akkuyu NGS üçüncü güç ünitesi için AKKUYU NÜKLEER A.Ş.'ye inşaat lisansı verilmesine ilişkin kararı onayladı. Akkuyu NGS'nin ikinci güç ünitesinde bulunan ve güvenlik akışında en önemli rollerden birini oynayan, radyoaktif atıkların çevreye atık olarak bırakılmasını önleyen reaktörün koruma kabuğunun iç kısmında bulunan ikinci katmanı için montaj çalışmaları tamamlandı. Birinci güç ünitesinde reaktör binasında bulunan reaktör şaftı ekipmanının en önemli ekipmanlarında biri olan taşıyıcı özelliği gören girişin kurulum işlemi tamamlandı. ikinci güç ünitesinin reaktör şaft ekipmanının elemanları teslim edildi.

Tablo 7. (Devamı)

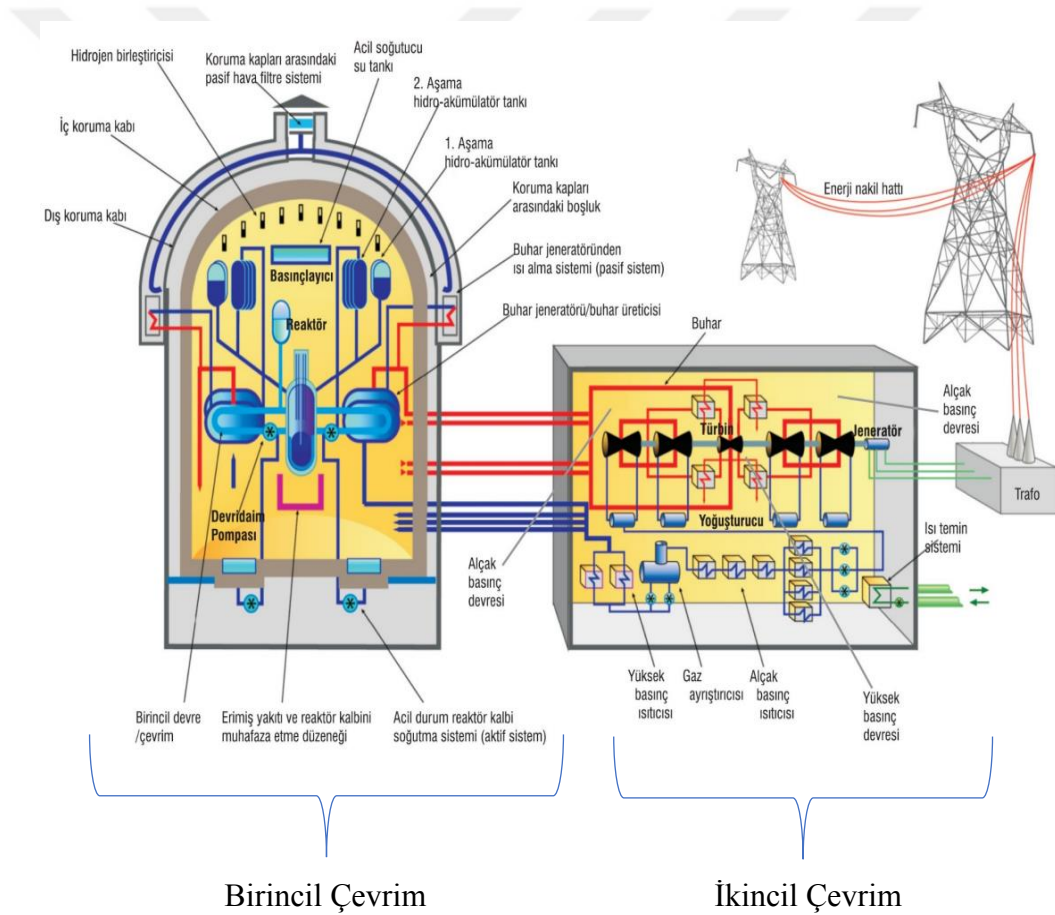
Yıl	Gelişimi
2021	10 Mart tarihinde Akkuyu NGS'nin üçüncü güç ünitesinin inşaa edilmesi vesilesiyle tören düzenlendi. T.C. Cumhurbaşkanı Sn. Recep Tayyip Erdoğan ve Rusya Devlet Başkanı Vladimir Putin video konferans yöntemiyle törene katılım sağladı. Akkuyu NGS sahasındaki etkinlik, T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanı Sn. Fatih Dönmez, Rosatom Devlet Kuruluşu Genel Müdürü Sn. Aleksei Likhachev, AKKUYU NÜKLEER A.Ş. Genel Müdürü Sn. Anastasia Zoteeva ve santralde bulunan diğer yetkililerinin katılımıyla gerçekleşti. İki ülkenin liderleri, üçüncü güç ünitesinin temeline ilk betonun dökülmesi sürecini başlattı. Birinci güç ünitesi türbin tesisinin ilk büyük gabarili bileşeni olan, yüksek ve orta basınçlı silindir (YOBS) rotoru inşaat sahasına teslim edildi. Akkuyu NGS birinci güç ünitesinin reaktör kazanı, projedeki konumuna yerleştirildi. Reaktör basınç kabının montajı, "Open Top" teknolojisi kullanılarak gerçekleştirildi. Akkuyu NGS'nin birinci güç ünitesinde reaktör binası iç koruma kabuğunun üçüncü katmanı monte edildi. 322 ton ağırlığındaki silindirik konstrüksiyonun kurulumu yaklaşık bir gün sürdü. Akkuyu NGS inşaat sahasında dördüncü güç ünitesinin inşaatının başlanmasına yönelik hazırlıklar başlatıldı. Akkuyu NGS'nin ikinci güç ünitesin reaktör binasında iç koruma kabuğunun ikinci katmanı monte edildi ve reaktör şaftının elemanları olan destek ve baskı kirişleri kuruldu. Nükleer Düzenleme Kurulu, AKKUYU NÜKLEER A.Ş.'ye Akkuyu NGS dördüncü güç ünitesi için inşaat lisansının verilmesi onayladı. Birinci güç ünitesine ait pompa istasyonunun temel plakasının yapımına başlandı.
2022	Birinci güç ünitesine iç koruma kabuğunun beşinci katmanının yapımı gerçekleşti. İkinci güç ünitesi için dört buhar jeneratöründen oluşan parti, Doğu Kargo Terminali'ne ulaştırıldı. Nükleer Güç Santralinin inşaat sahasında yapılan çalışmalar AKKUYU NÜKLEER A.Ş., Türkiye Cumhuriyeti Nükleer Düzenleme Kurumu (NDK), Nükleer Teknik Destek Anonim Şirketi (NÜTED), Türk Standartları Enstitüsü (TSE) ve Fransız şirketi Assystem ile Türk şirketleri "Türk Loydu" ve "Ersis" gibi bağımsız denetim kuruluşlarının sürekli kontrolü altındadır. Türk, Rus ve uluslararası kalite ve güvenlik standartlarına uygun olarak işletilmektedir.

2.4.3. Akkuyu Nükleer Güç Santrali Çevrimi ve Özellikleri

Akkuyu NGS'nde dört adet her biri 1200 MW güç üretebilen, VVER-2000 (AE-2006) tip reaktör bulunmaktadır. Buhar jeneratörü PGV-1000MK, yatay tip, tek damarlı geri kazanımlı bir ısı eşanjörü ve çelik 08X18H10T Y malzemesi kullanılmıştır. K-1000-60/3000, yoğunlaşma tipi bir buhar türbini, tek şaft, beş silindirik (2 LPC+HPC LPC), ayırma ve buhar süper ısıtma olacak şekilde tasarlanmıştır. GCNA -1391, bir hidrolik

gövde, iç kısımlar, elektrik motoru, üst ve alt ara parçalar, destekler ve yardımcı sistemler içeren pompa kullanılmıştır (URL-19, 2020).

Güç ünitesinde meydana gelen proje kazaları ve/veya olası sonuçlarını en düşük seviyeye indirmek için güvenlik sistemi ile donatılan Akkuyu NGS Güç Ünitesi ve Güvenlik Akış Şeması Şekil 27’de gösterilmektedir. Güç ünitesi, şekilde görüldüğü üzere, reaktör adası ve türbin adası olmak üzere iki çevrimden oluşmaktadır. Birinci çevrim radyoaktif ve bu çevrimde reaktör, dört ana devridaim pompası, dört ana devridaim sistemi, dört buhar üretici ve bir basınçlayıcı bulunmaktadır. Reaktör adasını yıkayan suya, aktarılan termal enerji açığa çıkar. Su, 320°C’ye kadar ısıtılır. Yüksek basınç altında olduğundan dolayı sıvı halde kalır. Reaktörlerdeki su buhar jeneratörüne iletilir. Birincil çevrimdeki ısı enerjisi ikincil çevrime aktarılmış olur.

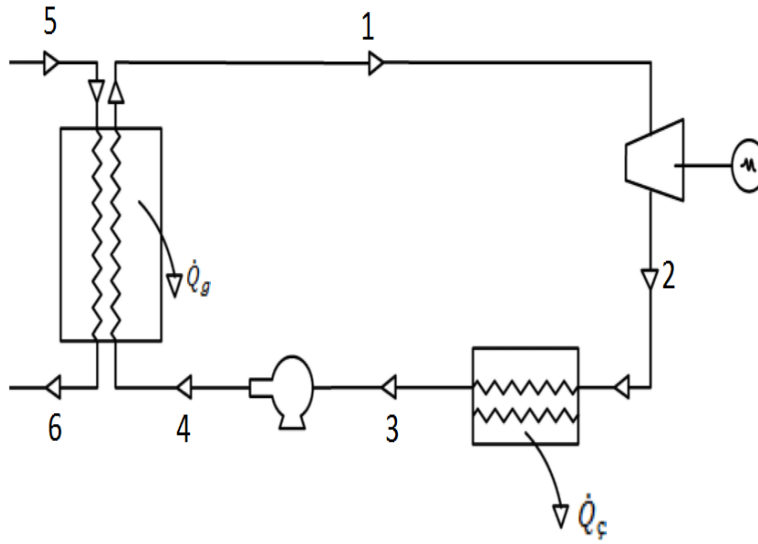


Şekil 27. Akkuyu NGS güç ünitesi ve güvenlik akış şeması (URL-7, 2020).

Şekil 28’de gösterilen güvenlik akış şemasında bulunan güç ünitesi ikinci çevrimi radyoaktif değildir. İkinci çevrimde yüksek basınç ısıtıcıları, buhar üretici, yoğuşturucu pompaları, besleme pompaları, yoğuşturucu sistemi, suyu tekrar temizleme sistemi, buhar çıkışı, taze buhar hattı, gaz giderici, alçak basınçlı temizleyen ısıtıcı sistemi,

besleme suyu sistemi, türbin ve türbin buharını temizleme sistemi bulunmaktadır. Türbinde, besleme suyu temizletici ısıtma tesisatı, su- buhar ayırıcıları-buhar ısıtıcıları, kompresör ünitesi ile buhar boşaltma tesisi, kendi ihtiyacı için devamlı olmayan ve çevrime kimyasal işlem görmüş ek ısıtılmış su alma sistemi de mevcuttur (URL-15, 2020).

Burada su daha düşük basınç altında olduğundan dolayı kaynama meydana gelerek buhar fazında türbine girmektedir. Türbinden çıkan ıslak buhar eş basınç altında kondensere iletilmektedir. Kondenserden atılan atık ısı çevreye verilmektedir. Atık ısı tesis çevriminin %66'sını oluşturmaktadır. %33'ü ise elektrik enerjisine dönüşmektedir (Kılıç, 2010).



Şekil 28. Akkuyu NGS ikinci çevrim akım şeması

2.5. Enerji ve Ekserji

Enerji geleneksel ifadeyle bir cisim ya da sistemin iş yapabilme yeteneği olarak tanımlanmaktadır. Termodinamiğin birinci yasasına göre enerji korunur, yok olmaz. Yani sistemle çevresinin etkileşimi sırasında sistemin kaybettiği enerji çevrenin kazandığı enerjiye eşit olmak zorundadır. Sisteme enerji geçişi ya da çıkışı, ısı ya da iş olarak gerçekleşebilir (Külekçi, 2009).

Bir sistemin sahip olduğu enerji ise entalpidir. Entalpi, maddenin veya sistemin yapısında depolanan her türden enerji toplamıdır. Akış enerjisi ve iç enerji depolanan enerji türleri olarak ifade edilebilir. Birim kütlenin entalpisi “h” ile gösterilir (Tüysüz, 2013).

Termodinamiğin ikinci yasası ise enerjinin niteliği ile yani kalitesi ile ilgilenir. Enerjinin kalitesini ifade eden kavram entropi olarak ifade edilmektedir. Bir sistemdeki düzensizlik miktarına ya da tersinmezliklerin ölçüsüne entropi denir (Tüysüz, 2013).

Bir sistemden elde edilebilecek maksimum enerji miktarına ise ekserji denir. Farklı bir ifade ile bir sistemden elde edilebilecek maksimum yararlı iştir. Günümüzde yaygın olarak kullanılan ekserji ifadesi 1824 yılında Sadi Carnot tarafından ilk defa kullanılmıştır. Yunanca’da tersinir anlamına gelen “ex” kelimesi ile iş anlamına gelen “ergon” kelimelerinin birleşimi ile türemiştir. Ekserji kelimesi aynı zamanda “kullanılabilirlik” olarak ifade edilebilmektedir. Enerjinin kullanılmayan kısmı ise kullanılmaz enerji, bağlı enerji ya da anerji olarak adlandırılır. Enerji, ekserji ve anerji kavramları Eşitlik 1 ile ifade edilebilir. Mekanik enerji ve elektrik enerjisi gibi sistemlerde anerji bölümü sıfıra eşittir. Aynı zamanda çevre enerjisinin ekserjisi sıfıra eşittir. Çünkü çevrenin iç enerjisinin tamamı anerjidir (Şahin, 2012).

$$\text{Enerji} = \text{Ekserji} + \text{Anerji}$$

(Eşitlik 1)

Ekserji, sistem durumunun çevresel durumdan uzaklaşmasının bir potansiyelidir. Ekserji genellikle sistem tersinmezlikleri nedeniyle ortaya çıkan entropi ile doğru orantılıdır. Ekserji ile enerji arasında ki temel fark ise ekserjinin ideal veya tersinir sistemler dışında korunum yasasına uğramaz. Enerji ve ekserji kavramlarının karşılaştırılması Tablo 8’de sunulmuştur.

Tablo 8. Enerji ve Ekserji karşılaştırması (Tüysüz, 2013).

Enerji	Ekserji
Termodinamiğin birinci yasası ile ilgilenir.	Termodinamiğin ikinci yasası ile ilgilenir.
Einstein kanununa göre mc^2 değerine eşittir. Sıfırdan farklı bir değer alır.	Ortam ile denge haline ulaştığında sıfıra eşittir.
Çevre özelliklerinden bağlı değildir. Sadece kütle ya da enerji akışının özelliklerine bağlıdır.	Çevre özelliklerine bağlıdır aynı zamanda kütle ya da enerji akışının özelliklerine de bağlıdır.
Tüm süreçlerde Termodinamiğin ikinci yasası ile sınırlıdır. Tersinir işlemlerde bu duruma dahildir.	Termodinamiğin ikinci yasası sebebiyle tersinir süreçler için sınırlı değildir.
Hareket veya hareket üretme yeteneğidir.	İş veya iş oluşturma yeteneğidir.
Yoktan var edilemez. Üretilemez sadece sürekli korunur.	Tersinir sistemlerde korunur. Tersinmez bir işlemde ise sürekli olarak tüketilir.
Sadece miktarın ölçütü niteliğindedir.	Entropi sebebiyle hem miktar hem de kalitenin ölçütü niteliğini taşır.

2.6. Ekserji Analizi

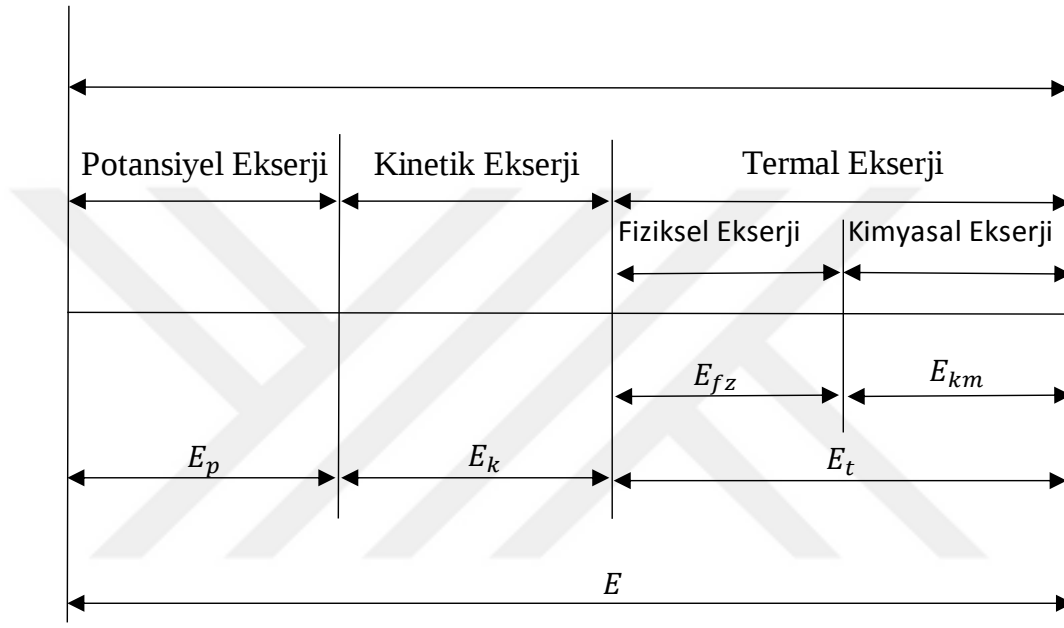
Enerji türlerinin değerlendirilmesinde en son kullanılan ekipmanlardan elde edilen verim miktarı ne kadar önemli ise elde edilme aşamasındaki enerji dönüşüm oranları da o kadar önemlidir. Kullanılan yakıt türünde, elde edilmesi istenilen enerji türüne dönüşüm oranının en yüksek oranda olması beklenmektedir. Dönüşümü gerçekleştiren sistemlerin verimleri ve çevre faktörleri düşünüldüğünde yakıtın enerjisinin tamamının ısı enerjisine veya mekanik enerjiye dönüştürülmesi imkansızdır. Bu sebeple enerji dönüşümünün %100 olması mümkün değildir. Dolayısıyla yakıttan elde edilebilecek maksimum faydalı enerji ekserji ile sınırlıdır (Sevilgen, 2004). Ekserji sınırlarında, enerji dönüşümleri gerçekleşmektedir. Enerji üretim, dönüşüm sistemlerinin ve sistemleri oluşturan ekipmanların ekserjiye göre değerlendirilmesi yapılmaktadır. Bu şekilde yapılan analiz yöntemi ekserji analizi olarak adlandırılmaktadır. Ekserji analizi ile tersinmezliklere bağlı olarak sistemde meydana gelen kayıplar tespit edilmekte ve yapılması gereken sistemsel iyileştirmeler belirlenmektedir.

Ekserji analizi yapmanın önemi ve yararlarını sıralayacak olursak;

- Ekserji analizinde enerji sistemlerinin tasarım aşaması ve analizi için termodinamiğin birinci yasasını, termodinamiğin ikinci yasası ile birlikte kullanan en yaygın yöntemdir.
- Ekserji analizi, enerji sistemlerindeki atık miktarlarını ve kayıpların özelliklerini, gerçekleştiği yerleri ve gerçek büyüklüklerini ortaya çıkaran yöntemdir.
- Ekserji analizi yardımıyla mevcut sistemlerdeki verimsizlikleri azaltarak, daha verimli enerji sistemleri tasarlamının olasıdır.
- Ekserji verimleri, sistemlerin ideal noktaya olan mesafesini ölçmekte aynı zamanda sistemlerin değerlendirilmesinde yardımcı olmaktadır.
- Karmaşık yapıda bulunan yani farklı ürün ya da akışkanların kullanıldığı sistemlerin analizlerinde, farklı karakteristikte olan ürünleri ortak paydada değerlendirerek ve enerji kalitesinin belirlenmesini sağlar.
- Ekserji analizi yöntemi, Ar-Ge faaliyetlerinde sistemlerin uygulanabilirliği, termal sistemlerin tasarımı ve mevcut tasarımların iyileştirilmesi konuları hakkında eksergo-ekonomik, termo-ekonomik ve çevre-ekonomik uygulamaları ile yardımcı olabilmektedir (Kurtaran, 2019).

2.6.1. Ekserji Çeşitleri

Ekserji çeşitleri için, Termodinamiğin birinci yasasında “Anerji ve ekserjinin toplamı değişmez. Tüm termodinamik süreçlerde sabit kalır.” Termodinamiğin ikinci yasasında ise “ Ekserji tersinir süreçlerde sabit kalır. Tersinir süreçlerde, ekserjinin bir kısmı ya da tamamı anerjiye dönüşür. Farklı bir ifade ile anerji, ekserjiye dönüşmez.” şeklinde açıklanmıştır. Bu açıklama doğrultusunda Şekil 29’da gösterilen ekserji bileşenleri ile Eşitlik 2 yazılabilir (Terzi, 2016).



Şekil 29. Ekserji bileşenleri (Özdilim, 2017).

$$E_x = E_{x_{kin}} + E_{x_{pot}} + E_{x_f} + E_{x_k} \quad (\text{Eşitlik 2})$$

Bu eşitlikte:

$E_{x_{kin}}$ = Kinetik Ekserji,

$E_{x_{pot}}$ =Potansiyel Ekserji,

E_{x_f} = Fiziksel Ekserji,

E_{x_k} =Kimyasal Ekserji,

Manyetik, elektrik, yüzey gerilim ve nükleer etkiler göz ardı edilmesi durumunda bir sistemin toplam ekserjisi Eşitlik 2 ile elde edilmektedir (Özdilim, 2017).

Ölü hal durumu

Sistemin çevre referans değerleri ile termodinamik denge halinde bulunması durumuna ölü hal denir. Ölü halde iken sistem, çevre sıcaklığında ve

basıncındadır. Kimyasal reaksiyona girmez. Yani çevre ile mekanik ve ısıl denge durumundadır. Ayrıca sistemin çevresine göre potansiyel ve kinetik enerjisi sıfırdır. Bir sistem başlangıç durumundan çevrenin referans değerlerine yani ölü hal durumuna getirilirse en yüksek ekserji değeri elde edilmiş olur. Sistemin ölü haldeki özellikleri P_0 , T_0 , h_0 , u_0 ve s_0 'dır.

Ölü hal durumunda;

$$P_0 = 1 \text{ atmosfer (101.325 kPa)}$$

$$T_0 = 25^\circ\text{C (298.15 K)}$$

$$h_0 = 104.9 \text{ kJ/kg}$$

$$s_0 = 0.3669 \text{ kJ/kgK}$$

Olarak kabul edilmektedir.

Kinetik Ekserji: Kinetik enerji, mekanik enerjinin farklı bir şeklidir. İşe tamamen dönüşebilir. Dolayısıyla bir sistemin kinetik enerjisinin ekserjisi yada iş potansiyeli çevrenin basıncına ve sıcaklığına bağımsız olarak kendi kinetik enerjisine eşittir. $E_{x_{kin}}$ ile gösterilir. Kinetik ekserjiyi elde etmek için Eşitlik 3 kullanılır.

$$E_{x_{kin}} = \frac{1}{2} m V^2 \quad (\text{Eşitlik 3})$$

Bu eşitlikte:

$$m = \text{kütle}$$

$$V = \text{hız}$$

Potansiyel Ekserji: Potansiyel enerji, mekanik enerjinin ayrı bir şeklidir. Dolayısıyla potansiyel enerji de işe tamamen dönüşebilir. Bir sistemin potansiyel enerjisinin ekserjisi, çevrenin basıncına ve sıcaklığına bağlı olmaksızın kendi potansiyel enerjisine eşittir. (Çengel ve Boles, 2008) $E_{x_{pot}}$ ile gösterilir. Çevre koordinatlarına göre yükseklik ile yer çekimi ivmesinin çarpımı bize bu ifadeyi verir (Eşitlik 4).

$$E_{x_{pot}} = g \cdot h \quad (\text{Eşitlik 4})$$

Bu eşitlikte:

h :çevre koordinatlarına göre yükseklik

g : yer çekimi ivmesi

Çevre koordinatlarına göre değişim olmadığı durumlarda potansiyel ve kinetik ekserji değişimi “0” kabul edilir (Özdilim, 2017).

Fiziksel Ekserji: Sistemin mevcut sıcaklığı (T), çevre sıcaklığına (T_0) ve mevcut basıncı (P), çevre basıncına (P_0) geldiğinde çevre şartları ile termodinamik denge hali elde edilir. Bu durumdan fiziksel ekserji sistemden elde edilecek maksimum iş olarak tanımlanır. Entalpi ve entropi parametrelerinin çevreye bağlı fonksiyonu olarak da tanımlanabilir. E_{x_f} ile gösterilir. Eşitlik 5 ile elde edilir (Geredelioğlu, 2011).

$$E_{x_f} = (h - h_0) + T_0(s - s_0) \quad (\text{Eşitlik 5})$$

Bu eşitlikte:

h : Entalpi (kJ/kg)

h_0 : Ölü hal entalpisi

T_0 : Ölü hal sıcaklığı

s : Özgül entropi (kJ/kgK)

s_0 : Ölü hal entropisi

Kimyasal Ekserji: Bir maddenin çevresiyle kimyasal denge haline geldiğinde ısı transferi ve madde alışverişinden dolayı yaptığı maksimum işe kimyasal ekserji denir. Kimyasal ekserji E_{x_k} ile gösterilir. Eşitlik 6 ile elde edilir.

$$E_{x_k} = RT_0 \cdot \ln \frac{P}{P_0} \quad (\text{Eşitlik 6})$$

Bu eşitlikte:

R : ideal gaz sabiti

T_0 : Ölü hal sıcaklığı

P : Basınç

P_0 : Ölü hal basıncı

Isıl Ekserji: Kimyasal ekserji ile fiziksel ekserjinin toplamı termal (ısıl) ekserjiyi verir. E_{x_t} ile gösterilir. Eşitlik 7 kullanılarak elde edilir.

$$E_{x_t} = E_{x_k} + E_{x_f} \quad (\text{Eşitlik 7})$$

Bu eşitlikte:

E_{x_k} : Kimyasal ekserji

E_{x_f} : Fiziksel ekserji

İş Ekserjisi

Maksimum iş potansiyeli ekserji olarak ifade edilmektedir dolayısıyla tüm süreçlerde iş, ekserjiye eşittir (Eşitlik 8). E_{x_w} ile gösterilir.

$$E_{x_w} = W \quad (\text{Eşitlik 8})$$

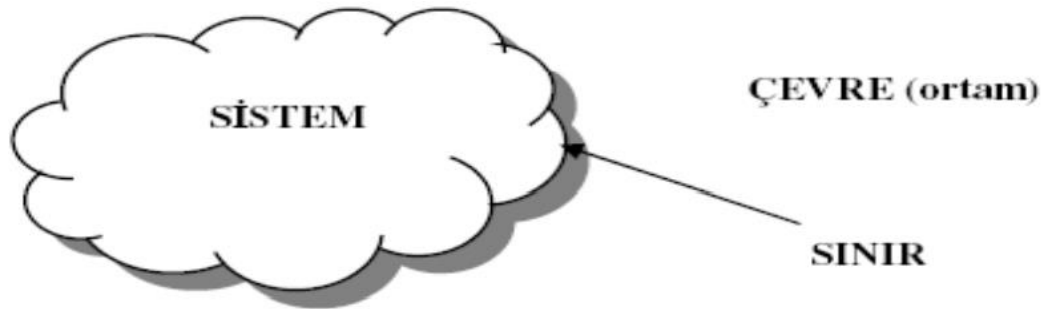
Bu eşitlikte:

W : İş

2.7. Termodinamik Analiz

Latince, therme (ısı) ve dynamis (güç) sözcüklerinden oluşan termodinamik sözcüğü, enerji bilimi olarak ifade edilebilir. Eski zamanlardan günümüze kadar ısıнын işe dönüştürülmesi olarak tanımlanabilmektedir. Günümüzde bu tanımlama, enerji ve enerji dönüşümlerinin tüm çalışmalarını barındıran bir anlam taşımaktadır. Termodinamikte enerji çözümlemeleri için bir sistem tanımlanmalıdır.

Termodinamik sistem, belirli bir kütleyi incelenmek üzere ayrılan alanı ifade eder. Termodinamik sistemin sınırları dışında kalan kütle veya bölgeye ise çevre denir. Sistem çevresinden ayıran gerçek veya hayali yüzey de sınır olarak adlandırılır (Şekil 30). Sınır sabit veya hareketli olabilir (Ünal, 2009).



Şekil 30. Sistem, sınır ve çevre (Ünal, 2009).

Belirli bir kütlenin veya belirli bir bölgenin çözümlemeye esas alınmasına göre sistemler kapalı veya açık olarak nitelendirilir. Kapalı sistem ya da diğer bir ifadeyle kontrol kütlesi, sabit kütleli ve sınırlarından kütle geçişi olmayan sistemdir.

Sürekli akışlı açık sistemde, kontrol hacminde bulunan kütle değeri zamanla değişmez yani sabittir. Kontrol hacminin sınırları içerisindeki hiçbir özellik zamanla değişmez. Giren kütle değeri çıkan kütle değerine eşittir. Sisteme birden fazla kütle giriş-çıkışı olabilir. Giriş ve çıkıştaki kütle debisi sonuç olarak her zaman sabittir (Eşitlik 9).

$$\sum \dot{m}_g = \sum \dot{m}_\chi = \Delta \dot{m}_{sistem} \quad (\text{Eşitlik 9})$$

Bu eşitlikte:

$\dot{m}_g$: girişteki kütleli debi

$\dot{m}_\chi$: çıkıştaki kütleli debi

$\dot{m}_{sistem}$: sistemin kütleli debisini vermektedir.

Sürekli akışlı açık sistemde kontrol hacmi içindeki toplam kütle zamanla değişmez. $\Delta \dot{m}_{sistem} = 0$ 'dır dolayısıyla sürekli akışlı açık sistem için süreklilik denklemi Eşitlik 10 ile gösterilir.

$$\sum \dot{m}_g = \sum \dot{m}_\chi \quad (\text{Eşitlik 10})$$

Basit bir rankine çevrimini oluşturan dört elemanın (pompa, kazan, türbin ve yoğunlaştırıcı) tümü sürekli-akışlı makinelerdir. Sürekli-akışlı açık sisteme ilişkin enerji denklemi Eşitlik 11 ile elde edilir.

$$(q_g - q_\chi) + (w_g - w_\chi) = h_g - h_\chi \quad (\text{Eşitlik 11})$$

Bu eşitlikte;

q_g : Giren ısı,

q_χ : Çıkan ısı,

h_g : Giriş entalpisi,

h_χ : Çıkış entalpisi,

w_g : giren iş,

w_χ : çıkan iş,

Kazan ve yoğuşturucuda iş etkileşimi yoktur (Eşitlik 12 ve Eşitlik 14). Kazana giren ısı miktarı Eşitlik 13 ile elde edilir. Yoğuşturucudan çıkan ısı değeri Eşitlik 15 ile elde edilir. Ayrıca türbin ve pompadaki hal değişimleri izantropik varsayılır (Eşitlik 16 ve Eşitlik 18). Pompa işi, çıkıştaki entalpi değerinin, girişteki entalpi değerinden farkı ile elde edilir (Eşitlik 17). Türbin işi, türbinin giriş ve çıkışındaki entalpi değerlerinin farkına eşittir (Eşitlik 19). Türbinden çıkan iş miktarı, pompaya giren iş miktarı arasındaki fark, net işi verir (Eşitlik 20).

Kazan ve yoğuşturucu için ($w = 0$) (Eşitlik 12)

$$q_g = h_g - h_g \quad (\text{Eşitlik 13})$$

Bu eşitlikte;

h_g : Giriş entalpisi,

h_g : Çıkış entalpisi,

q_g : Giren ısıyı verir.

Kazan ve yoğuşturucu için ($w=0$) (Eşitlik 14)

$$q_g = h_g - h_g \quad (\text{Eşitlik 15})$$

Pompa ($q=0$) (Eşitlik 16)

$$w_{pompa,g} = h_g - h_g \quad (\text{Eşitlik 17})$$

Bu eşitlikte;

h_g : Giriş entalpisi,

h_g : Çıkış entalpisi,

$w_{pompa,g}$: Pompa işini verir.

Türbin ($q=0$) (Eşitlik 18)

$$w_{türbin,g} = h_g - h_g \quad (\text{Eşitlik 19})$$

Bu eşitlikte;

h_g : Giriş entalpisi,

$h_ç$: Çıkış entalpisi,

$w_{türbin,ç}$: Türbin işini verir.

$$w_{net} = q_g - q_ç = w_{türbin,ç} - w_{pompa,g} \quad (\text{Eşitlik 20})$$

q_g : Giren ısı,

$q_ç$: Çıkan ısı,

$w_{türbin,ç}$: Türbin işi,

$w_{pompa,ç}$: pompa işi,

w_{net} : net işi verir.

2.7.1. Termodinamiğin Birinci Yasası

Termodinamiğin birinci yasası enerjinin korunumunu ifade etmektedir. Enerjinin yaratılamayacağını ya da yok edilemeyeceğini ancak biçim değiştirebileceğini yani farklı bir forma dönüştürülebileceğini anlatmaktadır. Termodinamikte enerji kavramı kapalı bir sistemden içeriye ısı ya da iş olarak geçme özelliğine sahiptir. Kapalı bir sistemde çevre ve sistem arasında sıcaklık farkından kaynaklı enerji akışı oluyorsa bu enerji “ısı” olarak ifade edilir. Fakat sıcaklık farkından dolayı enerji akışı olmayan durumlarda ise “iş” olarak ifade edilir. Termodinamikte, sistemin çevreye yaptığı iş ve çevreden sisteme yapılan ısı transferi pozitif; sistemden çevreye yapılan ısı transferi ve sistemin üzerine yapılan iş ise negatif olarak kabul edilir (Çengel ve Boles, 2008).

Sürekli akışlı açık sistemde kontrol hacminin toplam enerjisi sabittir. Kontrol hacmine giren toplam enerji kontrol hacminden çıkan toplam enerjiye eşittir. Bu durum Eşitlik 21 ile ifade edilebilir.

$$\begin{array}{ccc} \text{Birim zamanda ısı} & = & \text{Birim zamanda} \\ \text{veya iş olarak} & & \text{kütle ile birlikte} \\ \text{sınırları geçen} & & \text{kontrol hacminden} \\ \text{toplam enerji} & & \text{çıkan toplam} \\ & & \text{enerji} \end{array} - \begin{array}{c} \text{Birim zamanda} \\ \text{kütle ile birlikte} \\ \text{kontrol hacmine} \\ \text{giren toplam enerji} \end{array}$$

$$\sum \dot{E}_g = \sum \dot{E}_ç \quad (\text{Eşitlik 21})$$

Burada, θ akış işi de içinde olmak üzere akışkanın birim kütlelerinin toplam enerjisidir. $\theta = ke + pe + h$ Olduğu göz önüne alınırsa, enerji korunumu ilkesi Eşitlik 22 ile ifade edilir. Akış işi ihmal edilirse Eşitlik 23 kullanılır.

$$\dot{Q} - \dot{W} = \sum \dot{m}_c \left(h_c + \frac{v_c^2}{2} + gz_c \right) - \sum \dot{m}_g \left(h_g + \frac{v_g^2}{2} + gz_g \right) \quad (\text{Eşitlik 22})$$

Bu eşitlikte:

$\dot{Q}$: Birim zamanda ısı geçişi (kW)

$\dot{W}$: Güç, birim zamanda yapılan iş (kW)

$\dot{m}_c$: Çıkıştaki kütleli debi (kg/s)

Q_c : Yoğuşturucuda buhardan düşük sıcaklıkta denize/göle atılan ısı (kJ)

$\dot{m}_g$: Girişteki kütleli debi (kg/s)

Q_g : Yüksek sıcaklıkta buharlaştırıcıdan suya geçen ısı (kJ)

Potansiyel ve kinetik enerjiler ihmal edilirse Eşitlik 23 ile ifade edilir.

$$\dot{Q} - \dot{W} = \sum \dot{m}_c h_c - \sum \dot{m}_g h_g \quad (\text{Eşitlik 23})$$

Bu eşitlikte:

$\dot{Q}$: Birim zamanda ısı geçişi,

$\dot{W}$: Güç, birim zamanda yapılan iş,

$\dot{m}_c$: Çıkıştaki kütleli debi,

h_c : Çıkış entalpisi,

$\dot{m}_g$: Girişteki kütleli debi,

h_g : Giriş entalpisi,

Çevreyle ısı alışverişi durumunda sisteme giren ısı miktarı Eşitlik 24 ile elde edilir.

$$\dot{Q}_g = \dot{m}_g h_g \quad (\text{Eşitlik 24})$$

Bu eşitlikte:

$\dot{m}_g$: Girişteki kütleli debi,

h_g : Giriş entalpisi,

$\dot{Q}_g$: Sisteme verilen ısıyı verir.

Sistemden çıkan ısı miktarı ise Eşitlik 25 ile elde edilir.

$$\dot{Q}_\zeta = \dot{m}_\zeta h_\zeta \quad (\text{Eşitlik 25})$$

Bu eşitlikte:

$\dot{m}_\zeta$: Çıkıştaki kütleli debi,

h_ζ : Çıkış entalpisi,

$\dot{Q}_\zeta$: Çevreyle ısı alışverişi,

Sistemde üretilen net iş, sisteme giren ısı miktarından sistemden çıkan ısı miktarı farkı ile elde edilir (Eşitlik 26).

$$\dot{W}_{net} = \dot{Q}_g - \dot{Q}_\zeta = \dot{m} w_{net} \quad (\text{Eşitlik 26})$$

Bu eşitlikte:

$\dot{Q}_g$ = Yüksek sıcaklıkta buharlaştırıcıdan suya geçen ısı

$\dot{Q}_\zeta$ = Yoğuşturucuda buhardan düşük sıcaklıkta denize/göle atılan ısı

w_{net} : net iş miktarı

$\dot{W}_{net}$ = Üretilen net iş verir.

Pompa işi ise Eşitlik 27 ya da Eşitlik 28 ile elde edilir.

$$\dot{W}_{pompa} = \dot{m}_g h_g - \dot{m}_\zeta h_\zeta \quad (\text{Eşitlik 27})$$

$$W_{pompa,g} = v_g (P_\zeta - P_g) \quad (\text{Eşitlik 28})$$

Enerji değerleri ($\dot{E}$) ve ekserji değerleri ($\dot{E}_x$) değerleri ise sürekli akışlı açık sistemler Eşitlik 29 ve Eşitlik 30 yardımıyla elde edilir.

$$\dot{E} = \dot{m} h \quad (\text{Eşitlik 29})$$

$$\dot{E}_x = \dot{m} [(h - h_0) - T_0 (s - s_0)] \quad (\text{Eşitlik 30})$$

$$\dot{E}_{x_{lst}} = \sum \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) \dot{Q} \quad (\text{Eşitlik 31})$$

2.7.2. Termodinamiğin İkinci Yasası

Termodinamiğin birinci yasası ya da farklı bir ifadeyle enerjini korunumu ilkesi hal değişiminin belirlenmesi için zorunludur. Fakat sadece birinci yasanın sağlanması hal değişiminin gerçekleşmesinde yeterli olmamaktadır. Çünkü hal değişimlerinin yönü konusunda birinci yasa herhangi bir sınırlama koymaz ve birinci yasanın gerçekleşmesi hal değişimlerinin de gerçekleşeceği anlamına gelmez. Bir hal değişiminin gerçekleşme durumu sadece termodinamiğin ikinci yasasıyla gerçekleşir. Bu sebeple bir hal değişimi termodinamiğin hem birinci hem de ikinci yasasını sağlamıyorsa, gerçekleşemez.

Termodinamiğin ikinci yasası hal değişiminin yönünü belirlemenin yanı sıra enerjinin niceliği yanında niteliğini de ön plana çıkarır. Birinci yasa enerjinin biçim değiştirirken dönüşüm sırasındaki değişimleri sayısal olarak ifade eder ve niceliğini ele alır. Eğer sayısal değer eşit ise kaynak ve biçim bakımından farklı enerji arasında ayırım gözetmez. Fakat termodinamiğin ikinci yasası, enerjinin niteliği ile ilgilenir ve bu niteliğin bir hal değişimi esnasında nasıl değiştiğini hesaplamak için somut veriler ve metodlar ortaya koyar (Çengel ve Boles, 2008).

2.7.3. Kullanılabilirlik ve Kullanılabilir Enerji

Bir enerji kaynağı kullanılacağı zaman, öncelikle kaynakta bulunan enerji miktarı belirlenmelidir.

En önemli parametre ise enerji kaynağının iş potansiyeli ya da iş yapma olanağıdır. Başka bir ifade ile kaynakta var olan enerjinin ne kadarının kullanılabilir enerjiye dönüştürüleceğinin belirlenmesidir. Enerjinin geri kalanı veya işe dönüştürülemeyen bölümü ise atık ısı olarak çevreye verilen ısıyı oluşturmaktadır. Bir sistem belirli bir başlangıç halinden, tersinir bir hal değişimiyle çevrenin bulunduğu hale (ölü hale) gelirse sistemden en fazla iş elde edilir.

Bir sistemin eğer ölü halde ise çevresiyle termodinamik denge durumunda olduğu anlamına gelir. Ölü haldeyken sistem, çevre sıcaklığında ve basıncındadır. Yani sistem çevresiyle mekanik ve ısı denge halindedir. Ayrıca sistemin çevresine göre kinetik ve potansiyel enerjileri sıfırdır. Sistemin verilen başlangıç halinde, iş yapma olanağını ya da yararlı iş potansiyelini göstermekte ve bu da kullanılabilirlik olarak adlandırılmaktadır. Bir sistemin kullanılabilirliği ψ ile gösterilir (Al-Talabani, 2016).

Giriş hali indissiz olarak ölü hal 0 indisiyle gösterilirse, $V_0 = 0$, $z_0 = 0$ olmak üzere akışın kullanılabilirliği Eşitlik 32 ile elde edilir.

$$\psi = (h - h_0) - T_0(s - s_0) + \frac{V^2}{2} + gz \quad (\text{Eşitlik 32})$$

Bu eşitlikte:

h : Entalpi,

h_0 : Ölü hal entalpisi,

T_0 : Ölü hal sıcaklığı,

s : Özgül entropi,

s_0 : Ölü hal entropisi,

z : Akışkanın yüksekliği,

ψ : Kullanılabilirlik ifadesini vermektedir.

Bu denklemden kinetik ve potansiyel enerjiler ihmal edilirse, akış kullanılabilirliği Eşitlik 33 ile ifade elde edilir.

$$\psi = (h - h_0) - T_0(s - s_0) \quad (\text{Eşitlik 33})$$

2.7.4. İdeal Rankine Çevrimi Isıl Verimi

Bir ısı makinesine verilen ısı enerjisinin sadece bir kısmı işe dönüşür. Bir ısı makinesine girilen ısı enerjisinin net işe dönüşebilen kısmı, ısı makinesinin etkinliğinin bir ölçüsüdür ve ısı verim olarak ifade edilir.

İdeal rankine çevriminin ısı verimi ve türbinin verimi Eşitlik 34 ve Eşitlik 35 kullanılarak elde edilir.

$$\eta = \frac{w_{net}}{q_g} = 1 - \frac{q_c}{q_g} \quad (\text{Eşitlik 34})$$

$$\eta = \frac{W_{net}}{W_{türbin}} \quad (\text{Eşitlik 35})$$

İdeal rankine çevriminin ekserji verimi ise Eşitlik 36 ile ifade edilebilir.

$$\varepsilon = \frac{W_{net}}{\dot{E}_g} \quad (\text{Eşitlik 36})$$

Bu eşitlikte;

$\dot{W}_{net}$: Net üretilen güç,

$\dot{E}_g$: Giren ekserji,

ε : Ekserjik verimi verir.

2.8. Termoekonomik / Eksergoekonomik Analiz

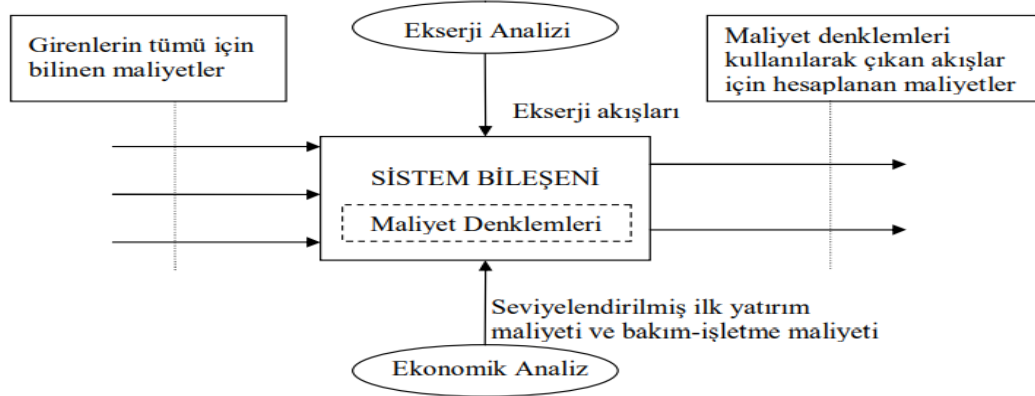
Termoekonomi, Termodinamiğin ikinci kanununa bağlı olarak gerçekleştirilen ekserji ile ekonomik prensipleri birleştiren bir analiz yöntemidir. Bu analizin gerçekleştirilmesi için literatürde birçok yöntem bulunmasına karşın birkaçı aşağıda sıralanmıştır.

- EEA – Ekserji Ekonomik Yaklaşım (Exergy Economic Approach)
- TFA – Termoekonomik Fonksiyonel Analiz (Thermoeconomic Functional Analysis)
- FEA – İlk Eksergoekonomik Yaklaşım (First Exergoeconomic Approach)
- EFA – Mühendislik Fonksiyonel Analizi (Engineering Functional Analysis)
- SAA – Yapısal Analiz Yaklaşımı (Structural Analysis Approach)
- EXCEM – Ekserji Maliyet Enerji Kütle Analizi (Exergy Cost Energy Mass Analysis)
- MOPSA – Modifiye Edilmiş Ürün Yapısı Analizi (Modified Productive Structure Analysis)
- SPECO – Özgül Ekserji Maliyeti Yöntemi (SPecific Exergy Costing) (Düzcan, 2019).

Bu çalışmada, ekserji kayıpları, yıkımları, maliyet dengelerinin tespiti ile iyileştirme çalışmaları amaçlandığından literatürde en çok tercih edilen yöntemlerden olan özgül ekserji maliyetleme (SPECO) yöntemi kullanılmıştır. 2006 yılında Tsatsaronis ve Lazzaretto tarafından geliştirilen SPECO yöntemi bir termoekonomik analiz farklı bir ifade ile eksergoekonomik analiz yöntemidir ve üç aşamadan oluşur;

- Sistemde bulunan tüm ekipmanların giriş ve çıkış noktalarının belirlenerek bu noktalara ait ekserji miktarlarının hesaplanması,
- Hesaplanan ekserji akımları üzerinden her bir sistem için ayrı ayrı ürün ve yakıt miktarlarının belirlenmesi,
- Ekserji miktarları kullanılarak maliyet hesabı yapılması,

İlk iki aşama için gerçekleştirilen hesaplamalar, ekserji analizi temeline bağlı olarak yapılır. Ekserji temeline bağlı olarak yapılan analizin ardında üçüncü aşamada ise maliyet hesabı devreye girer. Sisteme giren ve sistemden çıkan madde ya da enerji miktarları ısı ve iş yoluyla meydana gelen ekserji değerleri maliyet değerlerine dönüştürülür. Tüm bu süreçlerin şematik gösterimi Şekil 31’de gösterilmektedir.



Şekil 31. SPECO yönteminin analiz şeması (Mert, 2010).

Tüm bu açıklamalar doğrultusunda, öncelikle tesisin termodinamik analizi gerçekleştirilmiştir. Daha sonra tesiste bulunan her bir ekipman için yakıt-ürün belirlenmesi, SPECO yöntemi ile maliyet denklemleri ve birim ekserji maliyeti denklikleri ise termoekonomik analiz ile yapılmıştır.

Termoekonomik analiz uygulamasında, ekserjiye temellerine bağlı maliyet hesaplamalarında, sistemdeki her bir noktanın mali değeri bulunmaktadır. Dolayısıyla, sisteme kütle, ısı ve iş ile giren ve çıkan ekserji denklikleri sırasıyla maliyet denklikleri ile eşleştirilebilir.

Enerji santrallerinde maliyet değerlendirmelerinde, genellikle santralin birim enerji üretim maliyeti ve ilk yatırım maliyeti dikkate alınmaktadır. Santral için belirlenen kullanım ömrü boyunca yapılan tüm harcamalar (bakım/işletme maliyeti, ilk yatırım maliyeti) ve birim enerji elde edilmesinde gerekli maliyet miktarını ifade eden ekonomik değerlendirme parametresi birim enerji üretim maliyetini ifade etmektedir. Elektrik üretimine etki eden parametreler ise santralin bakım/işletme ve ilk yatırım maliyetidir.

İlk yatırım maliyeti, santralin aktif işleme başlamadan önce tam anlamıyla enerji üretim ve çalışma konumuna getirilmesi için bina, makina-teçhizat, arazi gibi temel ekipmanlar için yapılan harcamalarıdır. Enerji santrallerinde maliyet giderlerinin önemli bir kısmını ilk yatırım maliyetleri oluşturur.

İşletme/bakım maliyetleri ise santral kurulumundan sonraki aşamada, aktif çalışma sahasında enerji üretmek için ihtiyaç duyulan ve yapılması gereken harcamalardır. İşletme maliyetleri, sabit ve değişken işletme maliyeti olmak üzere iki şekilde gruplandırılır. Sabit işletme maliyeti çalışanların maaşları, primleri, planlanmış bakımlar, santral destek ekipmanları, santralin idari ve genel harcamaları gibi maliyetleri oluşturur.

Değişken işletme maliyetleri ise santralde kullanılan enerji, yakıtlar, kimyasallar, su, gazlar, katalizörler, yağlayıcılar, tükenebilir malzeme ve kaynaklar ile atıkların neden olduğu maliyetleri oluşturur (Kaya ve Koç, 2015). Nükleer güç santralleri için yatırım maliyetini oluşturan önemli kalemler Tablo 9’da verilmiştir.

Tablo 9. Nükleer santraller için yatırım maliyetini oluşturan önemli kalemler (Kaya ve Koç, 2015).

İlk Yatırım Maliyetleri
Doğrudan Maliyetler
Yer ve ilgili harcamalar
Reaktör Ekipmanları
İlk Yatırım Maliyetleri
Doğrudan Maliyetler
Türbin Ekipmanları
Elektrik Ekipmanları
Isı ve Geri Çevirme Ekipmanları
Yardımcı Ekipmanları
Montaj
Dolaylı Maliyetler
Tasarım ve Mühendislik
Proje Yönetimi
Hizmete Alma
Diğer Maliyetler
Eğitim
Vergi ve Sigorta
Taşıma
Kurucu Maliyeti
Yedek Parça
Beklenmeyen Giderler

Maliyet dengesi denkliği yazılırken genellikle bütün sistem maliyetleri ele alınır. Sistemin ürünü ile ilişkili maliyet değeri, ürünün üretilmesi sırasında oluşan maliyetlerin toplamına eşittir. Bu maliyetler, ilk yatırım maliyeti, yakıt maliyeti, bakım ve işletme maliyetlerinden oluşmaktadır. Eşitlik 37 ile ifade edilir.

$$\dot{C} = \dot{E}_x c \quad (\text{Eşitlik 37})$$

$$\dot{C}_{p,t} = \dot{C}_{f,t} + \dot{Z}_t^{Cl} + \dot{Z}_t^{OM} \quad (\text{Eşitlik 38})$$

Bu eşitlikte:

$\dot{C}_{f,t}$ = toplam yakıt maliyeti

$\dot{Z}_k^{Cl}$ = yıllık toplam ilk yatırım maliyeti

$\dot{Z}_k^{OM}$ = işletme bakım maliyeti

Yakıt ve ürün ile ilişkili tek bir akım söz konusu ise, yakıt ve ürün akışı kullanılır. Yıllık sermaye yatırımı (CI) ve işletme-bakım maliyetleri (OM) ile ilgili tüm maliyet oranını gösterir. Bu eşitlik sistemden çıkan ekserji akımlarının toplam maliyetinin, sisteme giren ekserji akımlarının yatırım, işletme ve bakım maliyetlerinin toplamına eşit olduğunu ifade etmektedir. $\dot{Z}_k^{Cl}$ değeri yıllık ilk yatırım maliyetinin, tesisin yıllık çalışma saaatine bölünmesi ile bulunmaktadır. Eşitlik 39 ile elde edilir. Toplam çalışma saati ile gerçek çalışma saati arasındaki fark ise tesisin periyodik bakım faaliyetleri için ayrılan zamanıdır. Sürekli tesislerde işletme bakım için ayrılan yıllık süre toplam $\dot{Z}_k^{OM}$ değeri ise ilk yatırım maliyet oranının, tesisin iskonto oranı ile çarpılması Eşitlik 40 ile elde edilir. Bu iki değişkenin toplamı ile $\dot{Z}_k^T$ gösterilir. $\dot{Z}_k^T$ ise Eşitlik 41 ile elde edilir.

$$\dot{Z}_k^{Cl} = \frac{PEC}{\text{çalışma saati}} \quad (\text{Eşitlik 39})$$

Bu eşitlikte:

PEC: Satın alınan ekipman maliyeti

$\dot{Z}_k^{Cl}$: Yıllık sermaye yatırımı verir.

$$\dot{Z}_k^{OM} = \dot{Z}_k^{Cl} \cdot i_{eff} \quad (\text{Eşitlik 40})$$

Bu eşitlikte:

$\dot{Z}_k^{Cl}$: k ekipmanının yıllık sermaye yatırımı

i_{eff} : iskonto oranı

$\dot{Z}_k^{OM}$: k ekipmanının işletme-bakım maliyetini verir.

$$\dot{Z}_k^T = \dot{Z}_k^{Cl} + \dot{Z}_k^{OM} \quad (\text{Eşitlik 41})$$

Bu eşitlikte:

$\dot{Z}_k^{Cl}$: k ekipmanının yıllık sermaye yatırımı

$\dot{Z}_k^{OM}$: k ekipmanının işletme-bakım maliyetini verir.

$\dot{Z}_k^T$: k ekipmanının toplam maliyeti verir.

Termoekonomik faktör f_k , bir ekipmanın maliyet kaynakları iki şekilde gruplandırılır. İlk olarak ekserjiyle ilgili olmayan maliyetler (ilk yatırım, bakım ve işletme maliyetleri) bulunurken ikinci olarak, ekserji kaybından kaynaklanan maliyetler ve ekserji yıkım miktarı bulunur. Bir ekipmanın performansına değerlendirmeleri yapılırken, her grubun bağıl öneminin anlaşılması gerekli ve önemlidir. Dolayısıyla her ekipman için tanımlanan termoekonomik faktör ya da eksergoekonomik faktör ile sağlanır. Termoekonomik faktör tesisin k ekipmanı için Eşitlik 42 ile ifade edilebilir (Ünal, 2009).

$$f_k = \frac{\dot{Z}_k}{\dot{Z}_k + c_{f,k} \dot{E}_{D,k}} \quad (\text{Eşitlik 42})$$

Bu eşitlikte:

$\dot{Z}_k$: sistemin k 'inci ekipmanının parasal değeri,

$c_{f,k}$: ekserjiye bağlı yakıt maliyeti,

$\dot{E}_{x_D}$: Ekserji yıkımı

Bağıl maliyet farkı r_k , incelenen tesisin ortalama maliyetindeki bağıl artışın, bir başka ifadeyle yakıt ile ürünün birim ekserji maliyetleri arasındaki farkın birim ekserji maliyetine oranını ifade etmektedir. Eşitlik 43 ile elde edilir.

$$r_k = \frac{c_{p,k} - c_{f,k}}{c_{f,k}} \quad (\text{Eşitlik 43})$$

Bu eşitlikte:

$c_{p,k}$: ekserjiye bağlı ürün maliyeti,

$c_{f,k}$: ekserjiye bağlı yakıt maliyeti,

r_k : Bağıl maliyet farkını verir.

Ekserji yıkım maliyetleri ($\dot{D}_{D,k}$), her ekipman yakıt ve ürün değeri için ayrı ayrı elde edilir. Eşitlik 44 ile elde edilir.

$$\dot{D}_{D,k} = c_{f,k} \dot{E}_{D,k} \quad (\text{Eşitlik 44})$$

Bu eşitlikte:

$c_{f,k}$: ekserjiye bağlı yakıt maliyeti,

$\dot{E}_{x_D}$: Ekserji yıkımı,

$\dot{D}_{D,k}$: Ekserji yıkım maliyetlerini verir.

$$\dot{E}_{x_f} = \dot{E}_{x_p} + \dot{E}_{x_D} \quad (\text{Eşitlik 45})$$

Bu eşitlikte:

$\dot{E}_{x_D}$: Ekserji yıkımı

$\dot{E}_{x_p}$: Ürün ekserjisi

$\dot{E}_{x_f}$: Yakıt ekserjisini verir.

$$\varepsilon_k = \frac{\dot{E}_{x_p}}{\dot{E}_{x_f}} = 1 - \frac{\dot{E}_{x_D}}{\dot{E}_{x_f}} \quad (\text{Eşitlik 46})$$

Tüm bu bilgiler doğrultusunda literatürde nükleer güç santralleri, termoekonomi analizi üzerine yapılan bazı çalışmalar Tablo 10' da oluşturularak sunulmuştur.

Tablo 10. Literatür araştırmaları

Çalışma Tarihi	Yazar	Çalışma Konusu	Sonuç
2004	Süleyman Hakan SEVİLGİN	Kojenerasyon Sisteminin Ekserjoekonomik Analizi	Toplam ekserjiyi, ekserji verimini maksimum yapan durumlar, birim elektrik ekserji maliyetini ve ortalama ekserji maliyetini minimum yapan durumlarda kriterlerin değişimi incelenmiştir. Kojenerasyon sistemler dizayn edilirken veya işletim sırasında optimum durumlar dikkate alınmalıdır. Aynı zamanda maliyet durumu değerlendirilmesi gerektiği sonucuna ulaşılmıştır.

Tablo 10. (Devamı)

Çalışma Tarihi	Yazar	Çalışma Konusu	Sonuç
2010	Rabi KARAALİ	Kojenerasyon Tesislerinin Termoekonomik Optimizasyonu	Tesiste tespit edilen ekserji kayıplarının azaltılması ile verimde artışın sağlanması ve verimin artmasıyla birlikte enerji maliyetlerinin, aynı zamanda çevreye atılan zararlı emisyonların miktarının azalması öngörülmüştür.
2010	Mehmet Selçuk MERT	Bir Güç Santralinin Ekserjik ve Termoekonomik Analizi	Termoekonomik analiz bulguları ile mevcut proses verileri karşılaştırılmıştır. Kütle, enerji dengeleri kurularak ekserji ve maliyet denklilikleri hesaplamaları yapılmıştır. Sistemde bulunan her bir ekipmanın ekserji ve eksergoekonomik analizleri yapılmıştır.
2011	Ceyhun YILMAZ	Thermodynamic and Economic Analysis of Geothermal Energy Use in Hydrogen Production and Liquefaction	Termoekonomik analiz sonucu jeotermal santralden üretilen elektriğin ve sıvılaştırılan hidrojenin birim ekserjetik maliyetini hesaplamışlardır.
2012	Sencer İMER, Akın DALBUDAK	Türkiye’de Nükleer Güç Santrali Kurulması ve Dış Politikaya Olası Etkileri	Kurulumu gerçekleştirilecek olan NGS’ler için yapılacak anlaşmalarda bu noktaya azami dikkat gösterilmesi ve anlaşma metninin, NGS’nin kurulum sürecinde ülkemizin kendi kararları ile, teknoloji transferini şekil, kurum, zaman olarak somut garantiler altına alan bir içeriğe sahip olması gerektiği sonucuna varmışlardır.

Tablo 10. (Devamı)

Çalışma Tarihi	Yazar	Çalışma Konusu	Sonuç
2013	Ceylan TÜYSÜZ	Bir Kritiküstü Termik Santralde Enerji ve Ekserji Analizi	Çalışmada örnek olarak seçilen termik santralin birim ilk yatırım, birim bakım onarım ve birim yakıt maliyetleri hesaplandı ve toplanarak birim elektrik üretim maliyeti bulundu. Çalışmanın yapıldığı döneme ait elektrik fiyatı ve kömür yakıtlı termik santrallerin birim enerji maliyetlerinin teorik bedeli ile karşılaştırıldığında oldukça ekonomik ve tercih edilmeye değer olduğu sonucuna varılmıştır.
2014	Saim ÖNGÜ	Nükleer Reaktörler, Yakıt Tipleri ve Mersin Akkuyu Nükleer Santrali	Ülkemizin yenilenebilir enerji kaynaklarının üretim tesislerine önem verilmesi, artırılması ve mevcut tesislerin geliştirilmesi gerektiği araştırılmıştır. Bu konularda iyileştirme ve geliştirme söz konusu olur ise ileriki süreçlerde enerji problemlerine çözüm üretilebilir. Birlikte enerji üretimi konusunda dışa bağımlılığında azalacağı sonucuna varılmıştır.
2014	Havva CEYLAN	Toprak Kaynaklı Isı Pompalı Isıtma Sisteminin Termoekonomik Analizi	Sistemin kondenser sıcaklığı, maliyetinin azaltılması, toprak devresi çıkış sıcaklığı ve elektrik enerjisi birim fiyatındaki azalmanın sistem ekipmanlarının ekserji üretim maliyeti ve yakıt fiyatı üzerine etkisi incelenmiş olup bu etkilerin sistem maliyetini iyileştirmesi yönünde sonuçlar elde edilmiştir.

Tablo 10. (Devamı)

Çalışma Tarih	Yazar	Çalışma Konusu	Sonuç
2015	Kadir KAYA, Erdem KOÇ	Enerji Üretim Santrallerinin Maliyet Analizi	Ülkemiz’de enerji üretim santrallerinin mevcut durumu ve enerji üretim potansiyelleri üzerine çalışılmış olup, genel olarak işletme/bakım maliyetleri ve kuruluş maliyetleri incelenmiştir. Santrallerin birim enerji üretim maliyetleri karşılaştırılarak değerlendirilmiştir.
2016	Ahmet POLATOĞLU	Türkiye’de Kurulması Planlanan Nükleer Santrallerde Kullanılacak Nükleer Yakıtların ve Atıkların Teknoekonomik Açıdan İncelenmesi	Dünya’da ve ülkemizde enerji durumu ve tesislerimizden olan nükleer santraller ile ilgili güncel bilgiler verilmiştir. Ülkemizdeki nükleer çalışmalar karşılaştırmalar yapılarak ele alınmıştır. Yakıtlar ve yakıt rezervlerinin kullanılabilirliği, maliyeti ve atıkların uygun depolama yöntemlerine öneriler sunulmuştur.
2016	Rauf TERZİ	VVER Nükleer Güç Santralinin Ekserji Analizi	VVER-1000 reaktörü kullanılan bir nükleer güç santralının enerji ve ekserji analizi yapılmıştır. Tesiste bulunan ekipmanlar ve reaktör için enerji ve ekserji kayıpları analiz edilmiş olup kayıpların en fazla hangi bileşenlerde olduğu ele alınmıştır. Tesis performansına yönelik öneriler sunulmuştur.

Tablo 10. (Devamı)

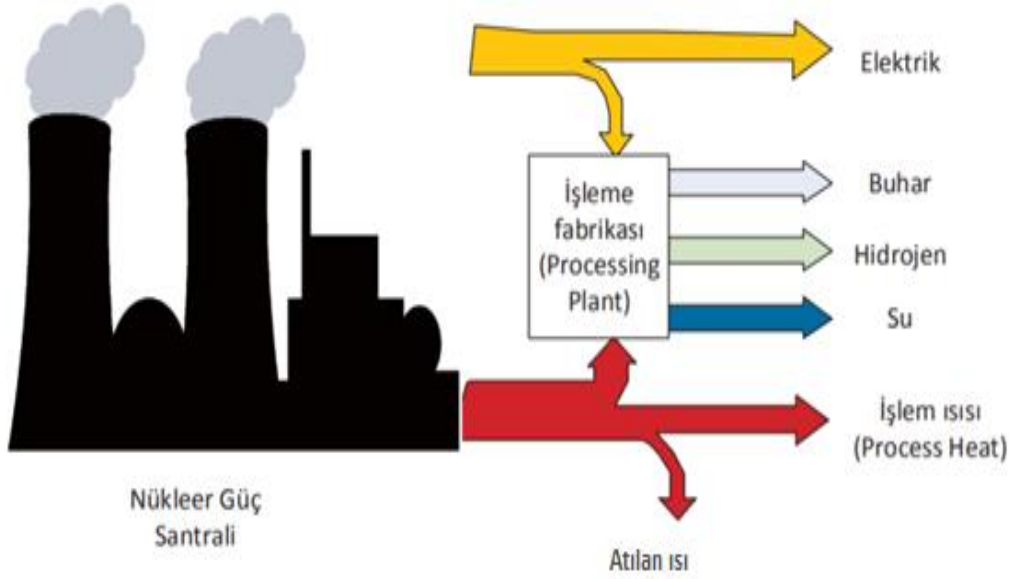
Çalışma Tarihi	Yazar	Çalışma Konusu	Sonuç
2018	Alperen TOZLU, Emrah ÖZAHİ, Ayşegül ABUŞOĞLU	Organik Rankine çevrimi entegre edilmiş S-CO ₂ kullanılan bir gaz türbin çevriminin termodinamik ve termoekonomik analizi	Termodinamik analizler sonucunda önerilen sistemin elektrik üretim kapasitesi, enerji ve ekserji verimliliğini sırasıyla değerlendirmişlerdir. Sistemin termoekonomik analizi için, ikinci yasa temelli yöntemler arasında yaygın olarak kullanılan özgül ekserji maliyetlendirme yöntemini (SPECO) uygulamışlardır.
2018	Alperen TOZLU, Emrah ÖZAHİ, Ayşegül ABUŞOĞLU	Organik Rankine çevrimi entegre edilmiş S-CO ₂ kullanılan bir gaz türbin çevriminin termodinamik ve termoekonomik analizi	Termodinamik analizler sonucunda önerilen sistemin elektrik üretim kapasitesi, enerji ve ekserji verimliliğini sırasıyla değerlendirmişlerdir. Sistemin termoekonomik analizi için, ikinci yasa temelli yöntemler arasında yaygın olarak kullanılan özgül ekserji maliyetlendirme yöntemini (SPECO) uygulamışlardır.
Tablo 2019	Ayşe Kübra PAKSOY	Gaz Motorlu Bir Isıl Güç Çevrim Santralinin Atık Isı Geri Kazanımının Termoekonomik Analizi	Bir endüstriyel sanayi tesisinde kurulması planlanan gaz motorlu bir ısıl güç santrali sistemi enerji gereksinimlerine göre incelenerek,iki tip gaz motoru üzerinden enerji ve eksergoekonomi analizleri yapılmıştır. Termodinamiğin birinci yasasına göre sistemin enerji analizleri ve enerji korunumu üzerinden hesaplamalar yapılarak tablolar ile gösterilmiştir. Tablo verilerine göre iyileştirme ve geliştirme önerileri sunulmuştur.

Tablo 10. (Devamı)

Çalışma Tarihi	Yazar	Çalışma Konusu	Sonuç
2020	Merve KARAGÖZ	Türkiye'nin Enerji Açığı Sorunu ve Öne Çıkan Enerji Kaynaklarının İncelenmesi	Enerji tasarrufu ve verimliliği konularında mevcut düzenin iyileştirilmesi, enerji çalışmalarında teknolojik çalışmaların geliştirilmesi ve yerli üretimin arttırılarak enerji ithalatçısı yerine enerji ihracatçısı durumuna gelinmesi adına ülkemizin kaynakları üzerine analizler yapılması gerektiği sonucuna varılmıştır.

Tablo 10'da sunulan literatür araştırmaları sonucunda, tesisler üzerinde termoeconomik analiz, maliyet değerlendirmeleri incelendiği, nükleer güç santralleri üzerine yapılan çalışmalarda ise santrallerin kurulumu, aşamaları, özellikleri, atık depolama yöntemleri incelendiği görülmüştür. Literatürde bu tür çalışmalar yapılmasına rağmen Akkuyu Nükleer Güç Santrali'nin termoeconomik analizi ve atık ısının değerlendirilmesine ilişkin bir çalışma bulunmamaktadır.

Bu çalışmada, literatürden farklı olarak Türkiye ile Rusya arasında 15 Temmuz 2010 tarihinde, tesis ve işletme iş birliği kapsamında imzalanan, ülkemizin ilk nükleer güç santrali olma özelliğine sahip, eş değer kapasitede dört reaktörün bulunduğu toplamda 4800 MW güç ve tam kapasite çalışması ile yıllık ortalama 35 Milyar kWh elektrik enerjisi üretebilecek şekilde tasarlanmış olan Akkuyu NGS için termoeconomik analizi ve atık ısının değerlendirilmesi incelenmiştir. Termoeconomik analiz sonucuna bağlı olarak Nükleer Güç Santralleri çalışma prensibi gereği çevreye atılan ısının dolaylı olarak tesise tekrar kazandırılmasıyla bölgesel ısıtmada (tesiste bulunan lojmanların, misafirhanelerin, ısınma, sıcak su ihtiyacı), bölgenin coğrafik şartları ve geçim kaynağı göz önünde bulundurularak sera ısıtmada, zirai kurutma ve soğutmada kullanılması sonucu enerji üretim maliyetinin düşürülmesi aynı zamanda ısıl kirliliğin önlenmesi amaçlanmıştır. Nükleer Güç Santrallerinden atılan ısı Şekil 32'de ve Akkuyu NGS'ne ait Güç Santrali Projesi üç boyutlu görseli Şekil 33'te yer almaktadır.



Şekil 32. Nükleer güç santrallerinden atılan ısı (Türkiye Bilimler Akademisi, 2019).



Şekil 33. Akkuyu NGS, güç santrali projesi (URL-20, 2011).

3. METOD VE YÖNTEM

Gerçek buharlı güç çevrimine göre çalışan Akkuyu Nükleer Güç Santrali'ne eşdeğer ekipman değerleri kullanılarak termodinamik eşitlikler yardımıyla ekserji analizi yapılmıştır. Termodinamiğin ikinci yasasına bağlı, maliyet analizi yöntemleri arasında en yaygın kullanılan sidealpesifik ekserji maliyetleme (SPECOC) yöntemi kullanılarak ekserjiye bağlı ürün, yakıt maliyetleri, bağlı maliyet farkı, performans değerlendirme değişkeni, ekserji yıkım maliyetleri ve toplam yatırım maliyetleri hesaplanmıştır. Analiz sonucu oluşturulan tablo verileri ile tesisten atılan ısı, tesise giren ısı, elektrik üretim maliyeti, yıllık kâr miktarı ve amortisman süresi belirlenmiştir. Akkuyu nükleer güç santrali için seçilen referans çevre koşulları 25°C sıcaklık ve 1 bar basınçtır. Termodinamik hesaplamalar için Engineering Equation Solver (EES) programı kullanılmıştır.

Tesisin Termodinamik verileri, 2004 yılında yayımlanan IEA-TECDOC-1391 de dahil olmak üzere çevre açısından güvenli Devlet Programı kapsamında hazırlanmıştır. AES-92 evrimsel NGS tasarımına dayanan reaktör tesisi V-392, V-392 ile Bulgaristan'da bulunan Belene NGS'nin eşdeğer ekipman değerleri kullanılmıştır (URL-19, 2020). Tüm hesaplamalarda hafif su kullanımı kabul edilmiştir (Kılıç, 2010). Tesise ait genel veriler Tablo 11'de sunulmuştur.

Tablo 11. Tesis verileri (URL-19, 2020).

Tesisin Genel Verileri	
Reaktörün termal çıkışı	3000 MW th
Santral Çıkışı, Brüt	1060 MW e
Santral Çıkışı, Net	1011 MW e
Santral Verimliliği, Net	%33,7
Çalışma Şekli	Temel yük ve yük takibi
Tesisin Tasarım Ömrü	60 Yıl
Tesisin Kullanılabilirlik Hedefi	> %90
Sismik Tasarım, SSE	0.2
Birincil Soğutucu Malzeme	Hafif Su
İkincil Soğutucu Malzeme	Hafif Su
Moderatör Soğutucu	Hafif Su
Termodinamik Çevrim	Rankine
Elektronik Olmayan Uygulama	Bölge Isısı

Nükleer sisteme ait tesis verileri Tablo 12'de sunulmuştur.

Tablo 12. Nükleer sisteme ait genel veriler sunulmuştur (URL-19, 2020).

Parametre adı	Değer
Nominal koşullarda buhar akış hızı	5880 kg/s
Buhar basıncı	6.27 MPa
Buhar sıcaklığı	278.5 °C
Nominal koşullarda besleme suyu debisi	6000 kg/s
Besleme suyu sıcaklığı	220°C

Tesiste kullanılan reaktörün özellikleri Tablo 13’te sunulmuştur.

Tablo 13. Reaktör özellikleri (Terzi, 2016).

Parametre adı	Değer
Reaktör nominal ısıtıcı gücü	3000 MW
Reaktör içinde soğutucunun akış hızı	90400 m ³ /h
Reaktör çıkışında soğutucu basıncı, mutlak	15.7 MPa
Reaktör girişinde soğutucu sıcaklığı	291°C
Reaktör çıkışında soğutucu sıcaklığı	321°C
Kullanılabilirlik faktörü	%90
Reaktör korundaki yakıt demeti sayısı, her bir sistem için	163
Uranyum (U-235) için yakıt demetlerindeki ortalama yakıt içeriği	%4.2
Maksimum yakıt yanma oranı	52.8 MW-gün/kg U

Reaktör soğutma sistemi özellikleri Tablo 14’te sunulmuştur.

Tablo 14. Reaktör soğutma sistemi (URL-19, 2020).

Parametre adı	Değer
Birimci soğutucu akış hızı	23888 kg/s
Reaktör işletme basıncı	15.7 MPa
Çekirdek soğutma sıvısı giriş sıcaklığı	291°C
Çekirdek soğutma sıvısı çıkış sıcaklığı	321°C
Çekirdek boyunca ortalama sıcaklık artışı	30°C

Tesiste bulunan türbinin özellikleri Tablo 15’te sunulmuştur.

Tablo 15. Türbin özellikleri (URL-19, 2020).

Parametre adı	Değer
Modeli	K-1000-60/3000
Yapısal düzen	1 HP silindiri ve 4 LP silindiri
Hızı	3000 rpm
Türbin girişinde buhar nem oranı	% 0.35
HP bölümünün giriş basıncı	5.88 MPa
HP bölümünün giriş sıcaklığı	274°C
Buhar tüketimi	5880 kg/s

Tesiste bulunan jeneratörün özellikleri Tablo 16’da sunulmuştur.

Tablo 16. Jeneratör özellikleri (URL-19, 2020).

Parametre adı	Değer
Modeli	TBB-1000-2Y3
Nominal güç	1000 MVA
Aktif güç	1110 MW
Voltaj	24 kV
Frekans	50 Hz
Buhar kapasitesi	1470 t/h
Buhar çıkış basıncı	6.27 MPa
Birincil soğutma suyu giriş sıcaklığı	321°C
Birincil soğutma suyu çıkış sıcaklığı	291°C
Besleme suyu sıcaklığı	220°C

Tesiste bulunan kondenserin özellikleri Tablo 17’de sunulmuştur.

Tablo 17. Kondenser özellikleri (URL-19, 2020).

Parametre adı	Değer
Tipi	Geri kazanımlı
Basıncı	3.4 kPa

Basınçlandırıcı, en alt kısmında dikey bir kap içerisinde elektrikli ısıtıcıları bulunur. Bu dikey kap içerisinde bulunan elektrikli ısıtıcılar reaktör işletimi sırasında birincil çevrimin kontrolü ve ısıtma işlemini sağlarlar. Basınçlandırıcı kabı, karbon çelikten oluşmaktadır. Basınçlandırıcının özellikleri Tablo 18’de verilmiştir.

Tablo 18. Basınçlandırıcı özellikleri (Terzi, 2016).

Parametre adı	Değer
Basınç, MPa	15.7
Kapasite (brüt kapasite), m^3	79
Nominal koşullarda su hacmi, m^3	55
Elektrikli ısıtıcı sayısı, adet	28
Elektrikli ısıtıcı bloklarının toplam gücü, kW	2520

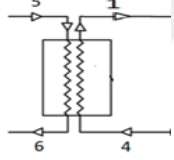
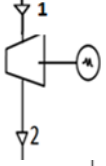
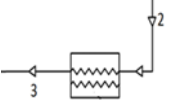
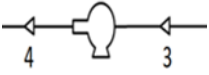
Tesisin radyoaktif olmayan ikinci çevriminde belirlenen noktalarda akış ekserjisi Eşitlik 33 kullanılarak belirlenmiş olup Tablo 19’da sunulmuştur.

Tablo 19. Akış ekserjisi eşitlikleri

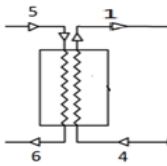
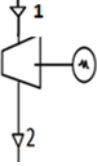
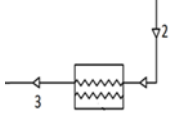
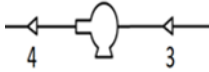
Akış No	Kullanılabilirlik Denklemleri
1	$\psi_1 = (h_1 - h_0) - T_0(s_1 - s_0)$
2	$\psi_2 = (h_2 - h_0) - T_0(s_2 - s_0)$
3	$\psi_3 = (h_3 - h_0) - T_0(s_3 - s_0)$
4	$\psi_4 = (h_4 - h_0) - T_0(s_4 - s_0)$
5	$\psi_5 = (h_5 - h_0) - T_0(s_5 - s_0)$
6	$\psi_6 = (h_6 - h_0) - T_0(s_6 - s_0)$

Akkuyu nükleer güç santralinin ekipman giriş ve çıkışlarında kullanılan enerji ve ekserji denklemleri Tablo 20’de sunulmuştur.

Tablo 20. Enerji ve ekserji eşitlikleri

Ekipman Adı	Ekipman Şekli	Enerji Eşitlikleri	Ekserji Eşitlikleri
Buharlaştırıcı		$\dot{E}_4 + \dot{E}_5 - (\dot{E}_1 + \dot{E}_6) = 0$	$\dot{E}_{x_4} + \dot{E}_{x_5} - (\dot{E}_{x_1} + \dot{E}_{x_6}) = \dot{E}_{x_D}$
Türbin		$\dot{E}_1 - \dot{E}_2 - W_t = 0$	$\dot{E}_{x_1} - \dot{E}_{x_2} = \dot{E}_{x_D}$
Yoğuşturucu		$\dot{E}_2 - \dot{E}_3 = 0$	$\dot{E}_{x_2} - \dot{E}_{x_3} = \dot{E}_{x_D}$
Pompa		$\dot{E}_3 - \dot{E}_4 = 0$	$\dot{E}_{x_3} + W_p - \dot{E}_{x_4} = \dot{E}_{x_D}$

Tablo 21. Yakıt ve ürün ekserjisi

Ekipman Adı	Ekipman Şekli	Ürün Ekserjisi	Yakıt Ekserjisi
Buharlaştırıcı		$\dot{E}_{x_p} = \dot{E}_{x_1} - \dot{E}_{x_4}$	$\dot{E}_{x_f} = \dot{E}_{x_6} - \dot{E}_{x_5}$
Türbin		$\dot{E}_{x_p} = \dot{W}_{türbin}$	$\dot{E}_{x_f} = \dot{E}_{x_2} - \dot{E}_{x_1}$
Yoğuşturucu		$\dot{E}_{x_p} = \dot{E}_{x_3} - \dot{E}_{x_2}$	Eşitlik 46 kullanılarak hesaplanmıştır.
Pompa		$\dot{E}_{x_p} = \dot{E}_{x_4} - \dot{E}_{x_3}$	Eşitlik 46 kullanılarak hesaplanmıştır.

Yatırım maliyetleri Tablo 22’de gösterilmektedir.

Tablo 22. Akkuyu nükleer güç santrali’nin maliyet analizi (Toprak ve Dal, 2017).

Akkuyu Nükleer Güç Santrali Maliyet Analizi	($\times 10^3 \\$)
Yatırım Öncesi Maliyetler	\$33211
İnşaat Maliyetleri	\$13964
İşletme Maliyeti	\$6194
Hizmetten Çıkarma Maliyeti	\$147113
Toplam Maliyet	\$20338
2016-2017 yıllarındaki değeri (20 yıllık)	\$26557
2016-2017 yıllarındaki değeri (30 yıllık)	\$40263

Tablo 23’de tesisin ekipmanlarının ekserjiye bağlı maliyet denge denklemleri ve birim ekserji maliyet denklemleri sunulmuştur.

Tablo 23. Ekserjiye bağlı maliyet eşitlikleri ve birim ekserji maliyet denklemleri

Ekipman Adı	Ekipman Şekli	Ekserjiye bağlı maliyet denge denklemleri	Birim ekserji maliyeti denklemleri
Buharlaştırıcı		$c_5 \dot{E}_{x_5} + c_4 \dot{E}_{x_4} + \dot{Z}_{buharlaştırıcı}$ $= c_6 \dot{E}_{x_6} + c_1 \dot{E}_{x_1}$	$c_{fk} = c_5 = c_6$ $c_{pk} = c_1$
Türbin		$c_1 \dot{E}_{x_1} + \dot{Z}_{türbin} = c_e \dot{W}_{türbin}$ $+ c_2 \dot{E}_{x_2}$	$c_{fk} = c_1 = c_2$
Yoğuşturucu		$c_2 \dot{E}_{x_2} + \dot{Z}_{kondenser} = c_3 \dot{E}_{x_3}$	$c_{fk} = 0$ $c_{pk} = c_3$
Pompa		$c_e \dot{W}_{pompa} + \dot{Z}_{pompa}$ $= c_4 \dot{E}_{x_4} - c_3 \dot{E}_{x_3}$	$c_{pk} = c_3 = c_4$

Akkuyu Nükleer Güç Santrali’nin bulunduğu ilde hizmet veren doğal gaz dağıtım şirketinden, ısınma ve sıcak su kullanımında konut başına düşen aylık tüketim miktarları resmi yazı ile talep edilmiştir. Talep ve cevap yazısı EKTEDİR. Tüketim verileri standart metreküp bazında temin edilmiş olup kWh’ a dönüştürülerek Tablo 24 ve Tablo 25’te sunulmuştur. Kojenerasyon tesislerinde çalışma verimi %80-90 aralığında olduğu belirtilmiştir (Meral vd., 2009). Çalışmada, ısınma ve sıcak su tesisi için atık ısının kullanım oranında %85 verime göre hesaplama yapılmıştır. Türkiye

Cumhuriyeti Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu, doğal gaz piyasası 2020 yılı sektör raporunda konut tüketimlerinde KDV ve ÖTV dahil 1 standart metreküp doğal gazın ikinci yarıyıl satış fiyatı ve 1 kWh tüketim için ödenen dolar, hesaplamalarda kullanılmıştır (T.C. EPDK, 2021). 2020 yılı sonuna ait dolar kuru ise Merkez bankasının resmi kaynaklarından alınmıştır (URL-21, 2022).

Mersin ilinde ortalama bir konutun ısınması için kullandığı doğal gaz miktarı aylık olarak sm^3 ve kWh cinsinden Tablo 24'te sunulmuştur.

Tablo 24. Mersin için ısınma amaçlı konut başına düşen aylık ortalama doğal gaz tüketim miktarı (Aksa Doğal Gaz, 2020)

Aylar	Sm^3	kWh
Ocak	212	2254
Şubat	195	2072
Mart	122	1298
Nisan	60	641
Mayıs	23	250
Haziran	10	107
Temmuz	0	3
Ağustos	17	184
Eylül	0	1
Ekim	15	163
Kasım	10	106
Aralık	66	707
TOPLAM	739	7783

Mersin ilinde ortalama bir konutun sıcak su kullanımı için kullandığı doğal gaz tüketim miktarı aylık olarak sm^3 ve kWh cinsinden Tablo 25'te sunulmuştur.

Tablo 25. Mersin için sıcak su kullanım amaçlı konut başına düşen aylık ortalama doğal gaz tüketim miktarı (Aksa Doğal Gaz, 2020).

Aylar	Sm^3	kWh
Ocak	27	285
Şubat	39	414
Mart	30	318
Nisan	23	250
Mayıs	18	190
Haziran	7	75
Temmuz	1	6
Ağustos	12	123
Eylül	0	1
Ekim	12	126
Kasım	8	88
Aralık	17	181
TOPLAM	193	2057

Tablo 25 verilerine göre bir konutun yıllık sıcak su kullanım amaçlı enerji tüketiminin 193 sm^3 yani 2057 kWh ve en fazla sıcak su tüketiminin Şubat ayında olduğu görülmektedir.

Sera havalandırma başlangıç sıcaklığı 25°C ve gündüz-gece, iç ortam sıcaklık değeri 16°C olacak şekilde seçilmiştir. Hesaplamalarda 01 Ekim-31 Mart yetiştirme dönemi ve domates bitkisi için yapılmıştır. Isıtma sistemi olarak tabana yakın yetiştirilen çelik borulu ısıtma sistemi tercih edilmiş ve su giriş sıcaklığı 90°C ve çıkış sıcaklığı 70°C olarak sisteme girilmiştir. Akdeniz iklim kuşağında bulunan bir ilin çalışmasında kullanılan üç farklı sera özelliği Mersin için örnek alınmıştır. Bölge şartlarına uygun sera tipi için hesaplama Tablo 26 üzerinden belirlenmiştir.

Tablo 26. Sera tipleri ve özellikleri (Çaylı ve Temizkan, 2018).

İsim kısaltması	Yan Duvar Örtü Malzemesi	Çatı Örtü Malzemesi	Taban Alanı	Örtü Yüzey Alanı
Tip-1	0.2 mm tek kat PE	0.2 mm tek kat PE	1920 m^2	3091 m^2
Tip-2	0.2 mm çift kat PE	0.2 mm çift kat PE	1920 m^2	3091 m^2
Tip-3	16 mm boşluklu PC	0.2 mm tek kat PE	1920 m^2	3091 m^2

Sera tiplerinden, ısı ihtiyacının en fazla duyulduğu sera tipi Tip-1 ısı perdesiz olduğunu ve ısı perdesi kullanılması durumunda Tip-1, Tip-2 ve Tip-3 sera tiplerinde sırasıyla %34, %32 ve %31 ısı tasarruf edilebileceğini tespit edilmiştir (Çaylı ve Temizkan, 2018). Dolayısıyla, gündüz ve gece sıcaklığı 16°C , havalandırma sıcaklığı ise 25°C olan Tip-1 sera için Akdeniz iklim kuşağında bulunan bazı illerin ısı ihtiyaçlarının karşılaştırılması için aylara göre ısı gereksinimi değerleri Tablo 27’de sunulmuştur. Sera ısıtmada verim miktarı %30-70 oranında olduğu belirtilmiştir (Kovacı vd., 2018).

Tablo 27. Akdeniz iklim kuşağındaki bazı illerin Tip-1 sera için aylara göre ısı gereksinimi (Çaylı ve Temizkan, 2018).

İl	Ocak	Şubat	Mart	Ekim	Kasım	Aralık	Toplam
kWh/m^2							
Adana	33.60	25.20	15.20	0.10	9.20	27.10	110.40
Antalya	34.70	27.90	18.80	0.30	11.50	27.60	120.80
Hatay	42.00	28.60	15.60	0.50	14.50	35.20	136.40
Kahramanmaraş	58.10	43.10	26.50	2.60	23.70	48.10	202.10
Mersin	29.70	22.20	12.40	0.00	7.60	24.00	95.90

4. BULGULAR VE İRDELEME

Tesisin radyoaktif olmayan ikincil çevriminde her ekipman için akış numaralandırmaları yapılmıştır. 1-4 akış noktaları arasında bulunan buharlaştırıcı, başlangıç ekipmanı olarak belirlenmiştir. Buharlaştırıcının giriş ve çıkış akış noktalarındaki sıcaklık özellikleri Tablo 12'den alınmıştır. 1-2 akış noktaları arasında bulunan izantropik türbin ve 2-3 akış noktaları arasında bulunan eş basınçlı yoğusturucu özellikleri için tesisten atılan ısının en yüksek oranda olması amaçlanarak Tablo 15 ve Tablo 17 verileri ile literatür araştırmaları doğrultusunda sıcaklık belirlenmiştir.

Tesisin ekserji analizini gerçekleştirmek amacıyla Eşitlik 33 kullanılarak oluşturulan akış ekserjisi eşitlikleri her akış noktası için Tablo 19'da sunulmuştur.

1 numaralı akış noktası için akış ekserjisi hesabı;

Ölü hal kabul edilen değerler

$$T_0 = 25^\circ\text{C}$$

$$h_0 = 104.9 \text{ kJ/kg}$$

$$s_0 = 0.3669 \text{ kJ/kg.K}$$

EES çözümleri ile edilen değerler,

$$h_1 = 1228 \text{ kJ/kg}$$

$$s_1 = 3.053 \text{ kJ/kg.K}$$

$$\psi_1 = (h_1 - h_0) - T_0(s_1 - s_0) \quad (\text{Eşitlik 33})$$

$$\psi_1 = (1228 \text{ kJ/kg} - 104.9 \text{ kJ/kg}) - 298.15 \text{ K}(3.053 \text{ kJ/kg.K} - 0.3669 \text{ kJ/kg.K})$$

$$\psi_1 = 322.240 \text{ kJ/kg}$$

1 numaralı akış noktası için akış ekserjisi hesaplama adımları yukarıda örnek olarak sunulmuştur. Tesiste belirlenen diğer 5 akış noktası için Tablo 19'da sunulan eşitlikler ile yukarıdaki hesaplama adımları kullanılmıştır.

EES'ye aktarılan veriler ve eşitlikler ile 36 adet eşitlik ve bilinmeyen (P, T, h, s, u, v) hesaplanmıştır. EES çözümlerine EKLER bölümünde yer verilmiştir. Hesaplanan termodinamik veriler Tablo 29'da sunulmuştur.

Tablo 29. Termodinamik veriler

Akış No	P (bar)	T (°C)	h (kJ/kg)	s (kJ/kgK)	v (kJ/kg)	v (m ³ /kg)	ψ (kJ/kg)
1	62.7	278.5	1228	3.053	1220	0.001328	322.240
2	7.381	40	835.04	3.053	897.8	6.307	70.721
3	7.381	30	126.4	0.4365	125.7	0.001004	0.748
4	62.7	30.14	131.9	0.4365	125.7	0.001002	6.249
5	15.7	321	1458	3.431	1435	0.001474	439.538
6	15.7	291	1289	3.139	1268	0.001342	357.599

Termodinamiğin birinci ve ikinci yasasına bağlı olarak, Tablo 29 verileri ile Eşitlik 29 kullanılarak enerji, Eşitlik 30 kullanılarak oluşturulan ekserji eşitlikleri Tablo 30'da sunulmuştur.

1 numaralı akış noktası için enerji hesabı;

Eşitlik 9'da sürekli akışlı sistemlerde kütle eşitliği kullanılarak giren ve çıkan kütle, Tablo 12'de belirtilen nominal akış hızı olarak ifade edilirse,

$$\sum \dot{m}_g = \sum \dot{m}_\zeta = \Delta \dot{m}_{sistem} \quad (\text{Eşitlik 9})$$

$$\sum \dot{m}_g = \sum \dot{m}_\zeta \quad (\text{Eşitlik 10})$$

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_2 = 5880 \text{ kg/s}$$

$$\dot{E}_1 = \dot{m}_1 h_1 \quad (\text{Eşitlik 28})$$

$$\dot{E}_1 = 7220640 \text{ kW}$$

1 numaralı akış noktası için ekserji hesabı;

Eşitlik 9'da sürekli akışlı sistemlerde kütle eşitliği kullanılarak giren ve çıkan kütle, Tablo 12'de belirtilen nominal akış hızı olarak ifade edilirse,

$$\sum \dot{m}_g = \sum \dot{m}_\zeta = \Delta \dot{m}_{sistem} \quad (\text{Eşitlik 9})$$

$$\sum \dot{m}_g = \sum \dot{m}_\zeta \quad (\text{Eşitlik 10})$$

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_2 = 5880 \text{ kg/s}$$

$$\dot{E}_{x_1} = \dot{m}_1 \psi_1 \quad (\text{Eşitlik 29})$$

$$\dot{E}_{x_1} = (5880 \text{ kg/s})(322.240 \text{ kJ/kg})$$

$$\dot{E}_{x_1} = 1894771 \text{ kW}$$

1 numaralı akış noktası için enerji ve ekserji hesaplama adımları yukarıda örnek olarak sunulmuştur. Tesiste belirlenen diğer 5 akış noktası için Tablo 20’de sunulan eşitlikler kullanılmıştır. Elde edilen değerler ise Tablo 30’da sunulmuştur.

Tablo 30. Enerji ve Ekserji değerleri

Akış No	Toplam Enerji	Toplam Ekserji
	$\dot{E} \text{ (kW)}$	$\dot{E}_x \text{ (kW)}$
1	7220640	1894767
2	4910035	415840
3	743232	4403
4	775572	36738
5	8748000	2637228
6	7734000	2145594

1-4 akış noktaları arasında bulunan buharlaştırıcıdan sisteme giren ısı miktarını bulmak için Eşitlik 24 kullanılmıştır.

$$\dot{Q}_g = \dot{m}_g h_g \quad (\text{Eşitlik 24})$$

$$\dot{Q}_g = \dot{m}_1 h_1 = 5880 \text{ kg/s} (1228 \text{ kJ/kg})$$

$$\dot{Q}_g = 7220640 \text{ kW}$$

2-3 akış noktaları arasında bulunan yoğuşturucudan çevreye atılan ısı miktarı yani tesisin atık ısı miktarını hesaplamak için Eşitlik 25 kullanılmıştır.

$$\dot{Q}_\zeta = \dot{m}_\zeta h_\zeta \quad (\text{Eşitlik 25})$$

$$\dot{Q}_\zeta = \dot{m}_2 h_2 = 5880 \text{ kg/s} (835.04 \text{ kJ/kg})$$

$$\dot{Q}_\zeta = 4910035 \text{ kW}$$

Santralde giren ve çıkan ısı miktarları karşılaştırıldığında, ısısının %32'si kullanırken, %68'i çevreye atık ısı olarak bırakılmaktadır.

1-2 akış noktaları arasında bulunan türbinin ürettiği net iş miktarını bulmak için Eşitlik 23 kullanılmıştır.

$$\begin{aligned}\dot{W}_{türbin} &= \sum \dot{m}_ç h_ç - \sum \dot{m}_g h_g & (\text{Eşitlik 23}) \\ -\dot{W}_{türbin} &= (\dot{m}_2 h_2) - (\dot{m}_1 h_1) \\ -\dot{W}_{türbin} &= (5880 \text{ kg/s} * 835.04 \text{ kJ/kg}) - (5880 \text{ kg/s} * 1228 \text{ kJ/kg}) \\ \dot{W}_{türbin} &= 2310605 \text{ kW}\end{aligned}$$

3-4 akış noktaları arasında bulunan pompa işi Eşitlik 27 kullanılarak hesaplanmıştır.

Pompada ısı alışverişi söz konusu değildir. Sistemde kinetik ve potansiyel enerjiler ihmal edilmiştir.

$$\begin{aligned}\dot{W}_{pompa} &= \dot{m}_g h_g - \dot{m}_ç h_ç & (\text{Eşitlik 27}) \\ -\dot{W}_{pompa} &= \dot{m}(h_4 - h_3) \\ \dot{W}_{pompa} &= 32340 \text{ kW}\end{aligned}$$

Buharlaştırıcıdan giren ısı miktarı ise Eşitlik 13 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\begin{aligned}q_g &= h_ç - h_g & (\text{Eşitlik 13}) \\ q_g &= h_1 - h_4 \\ q_g &= 1096.1 \text{ kJ/kg}\end{aligned}$$

Buharlaştırıcıdan çıkan ısı miktarı ise Eşitlik 15 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\begin{aligned}q_ç &= h_g - h_ç & (\text{Eşitlik 15}) \\ q_ç &= h_2 - h_3 \\ q_ç &= 708.64 \text{ kJ/kg}\end{aligned}$$

Türbinden çıkan iş miktarını hesaplamak için Eşitlik 19 kullanılmıştır.

$$w_{türbin,ç} = h_g - h_ç \quad (\text{Eşitlik 19})$$

$$w_{t\ddot{u}rbin,\zeta} = h_1 - h_2$$

$$w_{t\ddot{u}rbin,\zeta} = 39296 \text{ kW}$$

Pompaya giren iş miktarını hesaplamak için Eşitlik 28 kullanılmıştır.

$$W_{pompa,g} = v_g(P_\zeta - P_g) \quad (\text{Eşitlik 28})$$

$$W_{pompa,g} = v_3(P_4 - P_3)$$

$$W_{pompa,g} = \left(\frac{0.001004 m^3}{kg} \right) [(62.7 \text{ bar}) - (7.381 \text{ bar})] \times 100 (1 \text{ kJ} / 1 \text{ kPa} m^3)$$

$$W_{pompa,g} = 5.554 \text{ kJ/kg}$$

Santralde üretilen net iş miktarını hesaplamak için Eşitlik 20 kullanılmıştır.

$$w_{net} = q_g - q_\zeta = w_{t\ddot{u}rbin,\zeta} - w_{pompa,g} \quad (\text{Eşitlik 20})$$

$$w_{net} = 387.406 \text{ kJ/kg}$$

Santralde üretilen net gc miktarını hesaplamak için Eşitlik 26 kullanılmıştır.

$$\dot{W}_{net} = \dot{m} w_{net} \quad (\text{Eşitlik 26})$$

$$\dot{W}_{net} = (5880 \text{ kg/s})(387.406 \text{ kJ/kg})$$

$$\dot{W}_{net} = 2277947 \text{ kW}$$

1-4 akış noktaları arasında bulunan buharlaştırıcı kazanın verimini hesaplayabilmek için Eşitlik 34 kullanılmıştır.

$$\eta = \frac{w_{net}}{q_g} \quad (\text{Eşitlik 34})$$

$$\eta = \frac{387.406 \text{ kW}}{1096.1 \text{ kJ/kg}}$$

$$\eta = 0.35$$

1-2 akış noktaları arasında bulunan türbin verimini hesaplayabilmek için Eşitlik 35 kullanılmıştır.

$$\eta = \frac{\dot{W}_{net}}{\dot{W}_{t\ddot{u}rb\ddot{u}n}} \quad (\text{Eşitlik 35})$$

$$\eta = \frac{2277947 \text{ kW}}{2310604 \text{ kW}}$$

$$\eta = 0.98$$

2-3 akış noktaları arasında bulunan yoğunlaştırucu verimini bulmak için Eşitlik 34 kullanılmıştır.

$$\eta = \frac{w_{net}}{q_g} \quad (\text{Eşitlik 34})$$

$$\eta = \frac{387.406 \text{ kW}}{708.64 \text{ kW}}$$

$$\eta = 0.55$$

3-4 akış noktaları arasında bulunan pompa verimini bulmak için Eşitlik 34 kullanılmıştır.

$$\eta = \frac{w_{net}}{q_g} \quad (\text{Eşitlik 34})$$

$$\eta = \frac{387.406 \text{ kJ/kg}}{5.5 \text{ kJ/kg}}$$

$$\eta = 0.70$$

Santralin enerji verimliliğini hesaplamak için Eşitlik 34 kullanılmıştır.

$$\eta = \frac{w_{net}}{q_g} = 1 - \frac{q_g}{q_c} \quad (\text{Eşitlik 34})$$

$$\eta = \frac{387.406 \text{ kJ/kg}}{1096.1 \text{ kJ/kg}}$$

$$\eta = 0.35$$

Santralin ekserji verimliliğini hesaplamak için öncelikle Eşitlik 31 kullanılarak ekserji ısısı bulunmuştur.

$$\dot{E}_{x_{isl}} = \sum \left(1 - \frac{T_0}{T} \right) \dot{Q} \quad (\text{Eşitlik 31})$$

$$T_0 = 25^\circ\text{C}$$

$$T_{max} = 278^\circ\text{C}$$

$$\dot{Q}_{max} = 7220640 \text{ kW}$$

$$\dot{E}_{x_{isl}} = \sum \left(1 - \frac{298.15K}{551.65 K} \right) (7220640 \text{ kW})$$

$$\dot{E}_{x_{isl}} = 3318104 \text{ kW}$$

Santralin ekserji verimliliğini hesaplamak için Eşitlik 36 kullanılmıştır.

$$\varepsilon = \frac{W_{net}}{\dot{E}_{x_{isl}}} \quad (\text{Eşitlik36})$$

$$\varepsilon = \frac{2277947 \text{ kW}}{3318104 \text{ kW}}$$

$$\varepsilon = 0.68$$

Ekipmanların ürün ekserjisi ve yakıt ekserjisinin hesaplanmasına ilişkin eşitlikler Tablo 21 sunulmuştur. Tablo 21’de yer alan eşitlikler kullanılarak ürün ve yakıt ekserjisi, Eşitlik 45 kullanılarak ekserji yıkımları hesaplanmıştır.

Tüm bu hesaplamalar sonucunda elde edilen ısı transferi oranları, iş, spesifik akış ekserjisi, ekserji yıkımı, ürünler, ekserjik verim değerleri Tablo 31’de sunulmuştur.

Tablo 31. Akkuyu Nükleer Güç Santrali'nin termodinamik sonuçları

Ekipman	$\dot{Q}(kW)$	$\dot{W}(kW)$	$\dot{Ex}_f(kW)$	$\dot{Ex}_p(kW)$	$\dot{Ex}_D(kW)$	$\varepsilon(\%)$
Buharlaştırıcı	7220640		5257592	1858033	3399559	35.34
Türbin		2310604	2357759	2310604	47155	98
Yoğuşturucu	4910035		752720	411437	341283	54.66
Pompa		32340	45911	32340	13571	70.44
Enerji Verimliliği						35
Ekserji Verimliliği						68

Tablo 31 verilerine göre tesisin enerji ve ekserji verimi sırasıyla %35 ve %68 olarak hesaplanmıştır. Sistemde enerji yıkımının en fazla olduğu ekipman buharlaştırıcı olduğu görülmektedir. Bu durum buharlaştırıcıya giren ve çıkan akışların sıcaklık ve faz farkı ile açıklanabilir. Ekipmanların enerji verimleri, buharlaştırıcı için %35.34, türbin için %98, yoğunlaştırıcı için %54.66, pompa için %70.44 olarak hesaplanmıştır. Tesiste buharlaştırıcı ve yoğunlaştırıcıya bakıldığında ise diğer ekipmanlara göre daha düşük enerji verimine sahip olduğu görülmektedir.

Sisteme giren ısı miktarı 7220640 kWh, sistemden çıkan ısı miktarı ise 4910035 kWh olarak hesaplanmıştır. Akkuyu Nükleer Güç Santrali'nden çevreye %68 oranında ısı atılmaktadır. %32 oranında elektrik enerjisi üretilmektedir. Sisteme giren ısı miktarının üçte biri elektrik enerjisine dönüşürken üçte ikisi çevreye atık ısı olarak bırakılmaktadır.

Satın alınan ekipman maliyeti (PEC) için literatür araştırmaları doğrultusunda toplam PEC tutarı üzerinden, oranlar ile tesiste bulunan ekipmanların tutarları belirlenmiştir. Bu doğrultuda, Tablo 9'da yer alan ilk yatırım maliyetleri, satın alınan ekipman maliyetlerini oluşturmaktadır. Tablo 22'de ise inşaat maliyetleri, PEC tutarını oluşturmaktadır. PEC tutarı, buharlaştırıcı için %5, türbin için %6, yoğunlaştırıcı için %5, pompa için %4 olarak hesaplanmıştır. Toplam PEC tutarı üzerinden geriye kalan miktar ise tesisin diğer bileşenlerini oluşturmaktadır.

Tesisin ekonomik ömrü Tablo 22'de belirtilen 20 yıllık çalışma ömrü, çalışma saati ise toplam çalışma saati olan 8760 saat üzerinden tam kapasiteyle çalışması halinde 8040 saat olarak hesaplanmıştır. İşletme giderleri için tesisin %10 oranındaki iskonto oranı ile hesaplanmıştır.

Tesiste bulunan her bir ekipmanın, yıllık sermaye yatırımı için Eşitlik 39, bakım/onarım maliyeti için Eşitlik 40 ve toplam yıllık sermaye yatırımı için Eşitlik 41 kullanılarak hesaplama yapılmıştır.

$$\dot{Z}_k^{Cl} = \frac{PEC}{h} \quad (\text{Eşitlik 39})$$

$$\dot{Z}_k^{OM} = \dot{Z}_k^{Cl} i_{eff} \quad (\text{Eşitlik 40})$$

$$\dot{Z}_k^T = \dot{Z}_k^{Cl} + \dot{Z}_k^{OM} \quad (\text{Eşitlik 41})$$

Buharlaştırıcı için yıllık sermaye yatırımı, bakım/onarım maliyeti ve toplam yıllık sermaye yatırımı hesaplama adımları örnek olarak gösterilmiştir.

$$\dot{Z}_k^{Cl} = \frac{696785 \$}{8040h}$$

$$\dot{Z}_{buharlaştirıcı}^{Cl} = 86.66 \$/h$$

$$\dot{Z}_{buharlaştirıcı}^{OM} = (86.66 \$/h) 0.10$$

$$\dot{Z}_{buharlaştirıcı}^{OM} = 8.66 \$/h$$

$$\dot{Z}_{buharlaştirıcı}^T = 86.66 \$/h + 8.66 \$/h$$

$$\dot{Z}_{buharlaştirıcı}^T = 95.266 \$/h$$

Tesisin diğer ekipmanları için de aynı eşitlikler kullanılarak ve hesaplama adımları uygulanarak yıllık sermaye yatırımı, bakım/onarım maliyeti ve toplam yıllık sermaye yatırımı hesaplanmıştır.

Satın alma maliyetleri (PEC), ilk sermaye maliyet oranları, İşletme bakım maliyet oranları ve toplam sermaye maliyet oranları Tablo 32’de sunulmuştur.

Tablo 32. Akkuyu Nükleer Güç Santrali bileşenleri için ilk yatırım (IC), işletme ve bakım maliyetleriyle (OM) ilişkili toplam maliyet oranları

Ekipman Adı	PEC (\$)	$\dot{Z}_k^{Cl}$ (\$/h)	$\dot{Z}_k^{OM}$ (\$/h)	$\dot{Z}_k^T$ (\$/h)
Buharlaştırıcı	696.785	86.664	8.666	95.324
Türbin	883.898	109.937	10.993	120.930
Kondenser	696.785	86.665	8.666	95.330
Pompa	532.014	66.171	6.617	72.788
Tesisin diğer Bileşenleri	11154154	1387332	138.733	1400636
Toplam	13963636	1533290	153.329	1753424

Her ekipman için Tablo 30’da hesaplanan ekserji değerleri ve Tablo 32’de hesaplanan toplam maliyet oranları kullanılarak Tablo 23’te oluşturulan ekserjiye bağlı maliyet eşitlikleri ile ekserji maliyetleri hesaplanmıştır. Ekserji maliyetleri ve ekserji değerleri ile Eşitlik 37 kullanılarak her ekipmanın akış noktalarındaki maliyet oranları hesaplanmıştır. 1 numaralı akış noktası için maliyet oranı hesaplama adımları gösterilmiştir.

$$\dot{C}_1 = \dot{E}_{x_1} c_1 \quad (\text{Eşitlik 37})$$

$$\dot{C}_1 = (1894767 \text{ kJ/s})(14.996\$/h)(1Gj/1000000kj)(3600s/1h)$$

$$\dot{C}_1 = 102290 \text{ } \$/h$$

Her ekipman için yukarıdaki örnek işlem adımları ve Eşitlik 37 kullanılarak maliyet oranı hesabı yapılmıştır. Hesaplanan ekserji değerleri, maliyet oranları ve ekserjiye bağlı maliyetleri Tablo 33’de sunulmuştur.

Tablo 33. Akkuyu Nükleer Güç Santrali bileşenlerinin toplam maliyet oranları

Akış No	$\dot{E}_x(kW)$	$\dot{C}(\$/h)$	$c (\$/GJ)$
1	1894767	102290	14.996
2	415839	22449	14.996
3	4403	9336	590.262
4	36738	78067	590.262
5	2637228	172981	18.22
6	2145594	140734	18.22

Elektriğin üretim maliyeti ise;

$$c_g \dot{E}_{x_g} + Z_t = c_e \dot{E}_{x_{elk.}} + c_\zeta \dot{E}_{x_\zeta} \quad (\text{Eşitlik 47})$$

$$c_1 \dot{E}_{x_1} + Z_t = \dot{C}_{elk.} + c_3 \dot{E}_3 \quad (\text{Eşitlik 48})$$

$$c_e = 1.969 \text{ } \$/GJ$$

Tesisin elektrik üretim maliyetini hesaplamak için Eşitlik 47 oluşturulmuştur. Eşitlik 47’de tesise giren ve çıkan ısı miktarı, ekserjiye bağlı birim maliyet oranları ve tesisin toplam maliyet oranı, işletme, bakım faaliyetleri, yıllık sermaye yatırımı ve tesisin tam kapasiteli çalışma saati kullanılmıştır. 1 kWh için elektrik birim fiyatı 0.01969 \$/kWh olarak bulunmuştur.

6 Ekim 2010 tarihli resmi gazete açıklamasına göre, Türkiye Cumhuriyeti Devleti’nin Türkiye Elektrik Ticaret ve Taahhüt A.Ş. (TETAŞ) aracılığıyla satın aldığı elektrik tutarı;

Satın alınan elektrik miktarı ; $17.5 \times 10^{10} kWh$

Akkuyu NGS elektrik üretim birim fiyatı : 0.0196 \$/kWh

Elektrik üretim maliyeti= $17.5 \times 10^9 kWh$ (0.0196\$/kWh)

Elektrik üretim maliyeti = 343×10^6 \$

Satın alınan elektrik miktarı ; $17.5 \times 10^{10} kWh$

kWh elektriğin satın alma fiyatı : 0.1235 \$/kWh

Satılan alınan elektrik tutarı = $17.5 \times 10^{10} kWh (0.1235 \$/kWh)$

Satılan elektrik tutarı = 216125×10^4 \$

Santalin yıllık kâr miktarı = (Satılan elektrik tutarı)-(Elektrik üretim maliyeti)

Santralin yıllık kârı = $216125 \times 10^4 - 343 \times 10^6$

Satralin yıllık kârı= 181825×10^4 \$

Amortisman süresi = Yatırım Maliyeti / Yıllık kâr

Amortisman süresi = $(13963636 \times 10^3 \$) / (181825 \times 10^4 \$)$

Amortisman süresi=7.68 yıl

Türkiye Cumhuriyeti Devleti'nin, Türkiye Elektrik Ticaret ve Taahhüt A.Ş. (TETAŞ) tarafından satın alınan elektrik miktarı 216125×10^4 \$ olarak hesaplanmıştır. Akkuyu NGS tarafından üretilen elektrik maliyeti 343×10^6 \$ olarak hesaplanmıştır. Santralin kâr miktarı ise 181825×10^4 \$ olarak hesaplanmıştır.

Her ekipman için akış noktalarının giriş ve çıkışları dikkate alınarak Tablo 22'de oluşturulan birim ekserji maliyeti eşitlikleri ile ekipmanların ürün ve yakıtların ekserji maliyetleri hesaplanmıştır. Ekipmanların performans değerlendirmelerinin yapılabilmesi için termoeekonomik ya da eksergoekonomik faktör hesabı Eşitlik 42 kullanılarak yapılmıştır.

$$f_k = \frac{\dot{Z}_k^T}{\dot{Z}_k^T + c_{f,k} \dot{E}_{D,k}} \quad (\text{Eşitlik 42})$$

Tesisin ortalama maliyetinde ki bağıl artışın, farklı bir ifadeyle yakıt ile ürünün birim ekserji maliyetleri arasındaki farkın birim ekserji maliyetleme oranı olan bağıl maliyet farkı Eşitlik 43 ile tüm ekipmanlar için hesaplanmıştır.

$$r_k = \frac{c_{p,k} - c_{f,k}}{c_{f,k}} \quad (\text{Eşitlik 43})$$

Her ekipman için ekserji yıkım maliyeti Eşitlik 44 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\dot{D}_{D,k} = c_{f,k} \dot{E}_{D,k} \quad (\text{Eşitlik 44})$$

Buharlaştırıcı için ekserjiye bağlı ürün ($c_{p,k}$) ve yakıt maliyetleri ($c_{f,k}$), termoeconomik değerlendirme değişkeni olan bağıl maliyet farkı (r_k), performans değerlendirme değişkeni (f_k), ekserji yıkım maliyetleri ($\dot{D}_{D,k}$) hesaplama adımları gösterilmiştir.

- *Ürün ve yakıt maliyeti*

$$c_1 = c_{p,k}$$

$$c_5 = c_6 = c_{f,k}$$

- *Termoeconomik faktör hesabı*

$$f_{\text{buharlaştırıcı}}$$

$$= \frac{95.324 \text{ \$/h}}{(95.324 \text{ \$/h}) + \left[\left(18.22 \frac{\text{\$}}{\text{Gj}} \right) (3399559 \text{ kJ/s}) (1 \text{ Gj} / 1000000 \text{ kJ}) (3600 \text{ s/h}) \right]}$$

$$f_{\text{buharlaştırıcı}} = 0.29$$

- *Bağıl maliyet farkı hesabı*

$$r_{\text{buharlaştırıcı}} = \frac{(14.996 \text{ \$/Gj} - 18.22 \text{ \$/Gj})}{(18.22 \text{ \$/Gj})}$$

$$r_{\text{buharlaştırıcı}} = 0.17$$

- *Ekserji yıkım maliyeti hesabı*

$$\dot{D}_{D,k} = (18.220 \text{ \$/Gj}) (3399559 \text{ kJ/s}) (1 \text{ Gj} / 1000000 \text{ kJ}) (3600 \text{ s/h})$$

$$\dot{D}_{D,k} = 222983.87 \text{ \$/h}$$

Diğer tüm ekipmanlar için yukarıdaki örnek işlem adımları kullanılarak hesaplamalar yapılmıştır. Hesaplamalar sonucu, tesis bileşenlerinin ekserjiye bağlı ürün ($c_{p,k}$) ve yakıt maliyetleri ($c_{f,k}$), termoeconomik değerlendirme değişkeni olan bağıl maliyet farkı (r_k), termoeconomik faktörü (f_k), ekserji yıkım maliyetleri ($\dot{D}_{D,k}$) ve toplam yatırım maliyetleri ($\dot{Z}^T$) ise Tablo 34'te sunulmuştur.

Tablo 34. Akkuyu Nükleer Güç Santrali bileşenlerinin ekserjiye bağlı ürün ve yakıt maliyetleri, ekserji yıkım maliyetleri, eksergoekonomik faktörleri ve toplam yatırım maliyetleri

Ekipman	$c_{f,k}$ (\$/GJ)	$c_{p,k}$ (\$/GJ)	r (%)	f (%)	$\dot{D}_{D,k}$ (\$/h)	$\dot{Z}^T$ (\$/h)
Buharlaştırıcı	18.220	14.996	17.7	29.94	222984	95.330
Türbin	14.996	27.982	60.7	14.60	2545	120.930
Kondenser	0	590.262	100	100	0	95.330
Pompa	299.625	590.262	86.6	20.01	14639	72.788

Ekserjiye ve yakıta bağlı ürün maliyeti en yüksek olan ekipman pompa olduğu, ekserji yıkım maliyeti en yüksek olan ekipmanın ise buharlaştırıcı olduğu görülmektedir. Kondenser termoeekonomik faktör bakımından en yüksek maliyete sahip ekipman olması nedeni ile kondenserde yapılması düşünülen iyileştirmeler sistemin yatırım maliyetini arttırmayacaktır. Türbin’de iyileştirmeler yapılması sistemin performansını değiştirecektir. İlk yatırım maliyeti artırılarak proses birimlerinin verimi artırılmaya çalışılır.

Litertür araştırmaları doğrultusunda kullanım alanlarına göre belirlenen tesis verimlilikleri ile tesise giren ısı üzerinden kullanılabilir ısı miktarı hesaplanmıştır. Kullanım alanlarına göre kullanılabilir ısı miktarları Tablo 35’te sunulmuştur.

Tablo 35. Kullanım alanlarına göre kullanılabilir ısı miktarları

Kullanım Alanı	Dolaylı kazandırılan ısı miktarı/ $\dot{Q}_g$ (kWh)	Kullanım alanlarının çalışma verimliliği (%)	Kullanılabilir ısı miktarı (kWh)
Konut ısınma	4910035	%85	4173530
Konut sıcak su		%85	4173530
Sera		%60	2946021
Zirai kurutma		%60	2946021
Elektrik		%88	4320831

Akkuyu Nükleer Güç Santralinde ısınma ve sıcak su kullanımı yıllık tüketim miktarı yaklaşık 2500 adet konut (4500 kişilik yaşam alanı) yapımı için hesaplanmıştır. Yıllık tüketim miktarı sera için 10000 metrekare, zirai kurutma için 1000 metrekare alan için hesaplanmıştır. Elektrik tüketim miktarı ise 4500 kişilik yaşam alanı için düşünülmüştür. Bu bilgiler doğrultusunda atık ısının değerlendirilme oranları Tablo 36’te sunulmuştur.

Tablo 36. Atık ısının değerlendirilme oranları

Kullanım Alanı	$\dot{Q}_g$ (kWh)	Yıllık Tüketim Miktarı (kWh)	Atık ısının kullanım oranı (%)	Çevreye atılan ısı (%)
Konut ısıtma	4910035	19457500	%57.80	%10.20
Konut sıcak su		5142500	%57.80	%10.20
Sera		95900	%40.79	%27.20
Zirai kurutma		1528000	%40.79	%27.20
Elektrik		12789000	%59.84	%8.15

Tablo 24’te sunulan veriler doğrultusunda, bir konutun ısıtma amaçlı yıllık doğal gaz tüketim miktarı kullanılarak, Akkuyu NGS’de çalışan ve ailelerinin hizmetine sunulan yaklaşık 2500 adet konut (4500 kişilik yaşam alanı) için ısıtma amaçlı yıllık doğal gaz tüketim miktarı hesaplanmıştır. Atık ısının dolaylı olarak kazandırılmasıyla yaşam alanında bulunan 568 adet konutun ısıtma ihtiyacı atık ısıdan sağlanabilecektir. NGS ‘den atılan %67.99 oranındaki atık ısının %57.80’i faydalı ısıya dönüştürülmüştür. Böylelikle, çevrenin ısırlı kirliliğinde %57.80 oranında düşüş sağlanmış olacaktır.

Tablo 25’te sunulan veriler doğrultusunda, bir konutun sıcak su kullanım amaçlı doğal gaz tüketim miktarı kullanılarak, Akkuyu NGS’de çalışan ve ailelerinin hizmetine sunulan yaklaşık 2500 adet konut (4500 kişilik yaşam alanı) için sıcak su kullanım amaçlı yıllık doğal gaz tüketim miktarı hesaplanmıştır. Atık ısının dolaylı olarak kazandırılmasıyla yaşam alanında bulunan 2029 adet konutun sıcak su ihtiyacı atık ısıdan sağlanabilecektir. NGS’den atılan %67.99 oranındaki atık ısının %57.80’i faydalı ısıya dönüştürülmüştür. Böylelikle, çevrenin ısırlı kirliliğinde %57.80 oranında düşüş sağlanmış olacaktır.

Türkiye Cumhuriyeti Enerji Piyasası Düzenleme Kurulu, doğal gaz piyasası 2020 yılı sektör raporunda konut tüketimlerinde KDV ve ÖTV dahil 1 standart metre küp doğal gazın ikinci yarıyıl satış fiyatı 1.865 TL/sm³, 1 kWh tüketimin dolar karşılığına göre hesaplanmıştır.

$$1 \text{ sm}^3 = 10.64 \text{ kWh}$$

Merkez bankası kayıtlarına göre, 2020 yılı aralık ayı dolar kuru = 7.72 TL

$$1 \text{ kWh tüketim için dolar fiyatı} = (1.865 \text{ TL/sm}^3)(1\$/7.72\text{TL})(1\text{sm}^3/10.64\text{kWh})$$

$$1 \text{ kWh tüketim için dolar fiyatı} = 0.0227 \text{ \$/kWh}$$

Yıllık doğal gaz ihtiyacı ilde bulunan dağıtım şirketinden satın alınması halinde,

Yıllık doğal gaz tüketimi = Kullanılabilir ısı x 1 kWh doğal gaz alış fiyatı

$$(4173530 \text{ kWh}) \times (0.0227 \text{ \$/kWh}) = 94776 \text{ \$}$$

Atık ısının ısınma ve sıcak su ihtiyacında kullanılması halinde kullanılan miktarın mali karşılığı;

Elektrik üretim maliyeti = Kullanılabilir ısı x 1 kWh için elektrik üretim fiyatı

$$\text{Elektrik üretim maliyeti} = (4173530 \text{ kWh}) \times (0.0196 \text{ \$/kWh})$$

$$\text{Eleketrik üretim maliyeti} = 82177 \text{ \$}$$

Yukarıda ki hesaplamalar sonucunda, santralin yaşam alanında ısınma ve sıcak su kullanım ihtiyacı doğal gaz ile karşılanır ise 94.776 \$ ödenecektir. Fakat ısınma ve sıcak su ihtiyacı atık ısıdan karşılanır ise 82177 \$ değerinde ki atık ısı değerlendirilmiş olacaktır.

Bölgenin coğrafik şartları sebebiyle geçim kaynağı olan seracılık için Tablo 27’de sunulan veriler doğrultusunda, Mersin ilinin sera ısıtma işleminde 10000 metrekare alanın ısı gereksinimi hesaplanmıştır. Atık ısının dolaylı olarak kazandırılmasıyla bölgede bulunan seraların ısınma ihtiyacı %40.79 oranında atık ısının kullanılmasıyla sağlanabilecektir. % 67.99 oranında çevreye atılan ısının dolaylı olarak tesise tekrar kazandırılmasıyla %40.79’i faydalı ısıya dönüştürülmüştür. Böylelikle, çevrenin ısıl kirliliği % 40.79 oranında azalmış olacaktır.

Bölgenin coğrafik şartları sebebiyle geçim kaynağı olan zirai kurutma ve ısıtma işlemi için Tablo 28’de sunulan veriler doğrultusunda, Mersin ilinin zirai kurutma ve ısıtma işleminde 1000 metrekare alanın ısı gereksinimi hesaplanmıştır. Atık ısının dolaylı olarak kazandırılmasıyla zirai kurutma ve ısıtma tesislerinin ısınma ihtiyacı %40.79 oranında atık ısının kullanılmasıyla sağlanabilecektir. % 67.99 oranında çevreye atılan ısının dolaylı olarak tesise tekrar kazandırılmasıyla %40.79’u faydalı ısıya dönüştürülmüştür. Böylelikle, çevrenin ısıl kirliliği % 40.79 oranında azalmış olacaktır.

Şekil 34’te Tuik resmi web sitesinden alınan kişi başı yıllık elektrik tüketim verisi doğrultusunda, ile Tedaş Sektör raporu karşılaştırılmıştır. Aynı zamanda konut tüketicileri için 2022 yılı Haziran 1 kWh elektrik fiyatı 1.593 TL/kWh olan tutar için KDV (%18) oranı eklenmesi halinde, bu tutar 1.880 TL/kWh olur. Çalışmamızda, dolar üzerinden hesaplamalar yapıldığından, bu tutarın dolar karşılığı 0.125 \$/kWh olarak

hesaplanmıştır. Elektrik dağıtım ve üretimi için tesis verimliliği için %88 üzerinden hesaplama yapılmıştır.

Yıllık elektrik ihtiyacı ilde bulunan dağıtım şirketinden satın alınması halinde,

Yıllık elektrik tüketimi = Kullanılabilir ısı x 1 kWh elektrik alış fiyatı

$$(4320831 \text{ kWh}) \times (0.125 \text{ \$/kWh}) = 540104 \text{ \$}$$

Atık ısının elektrik ihtiyacında kullanılması halinde kullanılan miktarın mali karşılığı;

Elektrik üretim maliyeti = Kullanılabilir ısı x 1 kWh için elektrik üretim fiyatı

$$\text{Elektrik üretim maliyeti} = (4320831 \text{ kWh}) \times (0.0196 \text{ \$/kWh})$$

$$\text{Elektrik üretim maliyeti} = 84688 \text{ \$}$$

Yukarıda ki hesaplama sonucunda, santralin yaşam alanında elektrik ihtiyacı ilde hizmet veren dağıtım şirketinden satın alınır ise 540104 \$ ödenecektir. Fakat elektrik ihtiyacı atık ısıdan karşılanır ise 84688 \$ değerinde ki atık ısı değerlendirilmiş olacaktır.

5. SONUÇ VE DEĞERLENDİRME

Bu çalışmada ülkemizin ilk nükleer santrali olma özelliğine sahip olan Mersin'de bulunan Akkuyu Nükleer Güç Santrali'nin termodinamik ve termoekonomik analizi yapılmıştır. Tesisin termodinamik değerleri Engineering Equation Solver (EES) paket programı ile hesaplanmıştır. Tesisten atılan, tesise giren ısı miktarları, elektriğin üretim maliyeti, yıllık kâr miktarı ve tesisin amortisman süresi hesaplanmıştır.

- 1 kWh elektrik 0.0196 \$'a üretilecektir.
 - Türkiye Cumhuriyeti Devleti'nin Türkiye Elektrik Ticaret ve Taahhüt A.Ş. (TETAŞ) aracılığıyla, Akkuyu NGS'den satın alınan elektrik miktarı santrale yıllık 1818250×10^3 \$ kâr sağlayacaktır. Sağlanan kâr ile ülkemizin cari açığı azalmış olacaktır.
 - Santralin yatırım maliyetleri ve yıllık kâr miktarı dikkate alındığında amortisman süresi 7-8 yıl arasında olacaktır.
- Akkuyu NGS'de çalışan ve ailelerinin hizmetine sunulan yaklaşık 2500 adet konutun (4500 kişilik yaşam alanı);
- Tablo 35'te verilen kullanım alanlarına göre kullanılabilir ısı miktarları hesaplamalarında, yıllık ısınma ve sıcak su ihtiyacı doğrultusunda çevrimden atılan ısının dolaylı olarak tesise tekrar kazandırılmasıyla 568 adet konutun ısınma, 2029 adet konutun sıcak su ihtiyacı karşılanabilecektir.
 - Isınma ve sıcak su ihtiyacı için çevrimden atılan %67.99 oranındaki atık ısının tesise tekrar kazandırılmasıyla %57.80'i faydalı ısıya dönüştürülmüş olup çevreye atılan ısı miktarı %10.20'ye düşürülmüştür. Çevrenin ısırlırlılığı %57.80 oranında azaltılmış olacaktır.
 - Santralin yaşam alanında ısınma ve sıcak su kullanım ihtiyacı doğal gaz ile karşılanır ise 94776 \$ ödenecektir. Fakat ısınma ve sıcak su ihtiyacı atık ısıdan karşılanır ise 82177 \$ değerindeki atık ısı değerlendirilmiş olacaktır. Birim enerji sarfıyatında da %15.81 oranında kâr sağlanmış olacaktır.
 - Bölgenin coğrafik şartları ve geçim kaynağı olan sera ısıtmada atık ısının yaklaşık %40.79'u kullanılmıştır. %67.99 oranında çevreye atılan ısı dolaylı olarak

tesise tekrar kazandırılmasıyla faydalı ısıya dönüştürülmüş %27.20'si çevreye atılmıştır. Çevrenin ısıl kirliliği %40.79 oranında azaltılmış olacaktır.

- Santralin, yaşam alanında elektrik ihtiyacı ilde hizmet veren dağıtım şirketinden satın alınır ise 540104 \$ ödenecektir. Fakat elektrik ihtiyacı atık ısıdan karşılanır ise 84688 \$ değerindeki atık ısı değerlendirilmiş olacaktır. 540104 \$ tesisin kâr edilecektir. Birim enerji sarfiyatında da %84.31 oranında kâr sağlanmış olacaktır.

- Tablo 35'te verilen kullanım alanlarına göre kullanılabilir ısı miktarları hesaplamalarında, yıllık elektrik ihtiyacı doğrultusunda çevrimden atılan ısıнын dolaylı olarak tesise tekrar kazandırılmasıyla 1521 kişinin elektrik ihtiyacının atık ısıdan karşılanabileceği hesaplanmıştır. Tesisten atılan %67.99 oranındaki atık ısıнын % 59.84 değerlendirilerek %8.15'i çevreye atılmıştır. Çevrenin ısıl kirliliğinde %59.84 oranında düşüş sağlanmış olacaktır.

Bu bağlamda, çevrimden atılan ısı dolaylı olarak kazandırılarak tesiste bulunan lojmanların, misafirhanelerin ısınma, sıcak su ihtiyacı (bölgesel ısıtma), bölgenin geçim kaynağı olan seracılık (seralarda ısıtma), ziraî kurutma ve ısıtma işlemlerinde ve bölgenin elektrik ihtiyacının karşılanması için faydalı ısı elde edilmiştir. Faydalı ısı elde edilmesiyle, üretilen enerjinin birim maliyeti düşürülmüş ve aynı zamanda ısıl kirlilik önlenmiştir. Ülke ekonomisine ve çevreye olan sorumluluğumuza karşı önemli ölçüde katkı sağlamış olacaktır.

Bu çalışmanın sonuçları doğrultusunda öneriler;

Çalışmamızın devamında ısıtma çevrimi yerine, çevrimden atılan ısıнын tesise dolaylı olarak kazandırılmasıyla soğutma çevrimi oluşturulabilir. Bölgede bulunan yaşam alanı ya da farklı enerji çevrimlerinde soğutma işlemleri için faydalı ısı elde edilmesi amaçlanabilir.

Termoekonomi analizi ile atık ısıнын faydalı ısıya dönüştürülmesini amaçlayan farklı alanlarda çalışmalar yapılabilir.

Mersin ilinde bulunan Türkiye Şişe ve Cam Fabrikaları A.Ş. Şişecam Cam Ambalaj Mersin Fabrikası Şubesi ya da Türkiye Şişe ve Cam Fabrikaları A.Ş. Şişecam Kimyasallar Mersin Soda Fabrikası Şubesi için termoekonomi analizi uygulanabilir. Tesislerden atılan ısılar ise çimento, gıda sanayi ya da soğutma sistemlerinde değerlendirilebilir.

KAYNAKÇA

- Agaçbiçer, G. (2010). *Yenilenebilir enerji kaynaklarının Türkiye ekonomisine katkısı ve yapılan SWOT analizler. Yüksek lisans tezi, Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi, (298012).*
- Al-Talabani, M.G. (2016). *Bir kombine çevrim santralinin enerji ve ekserji analizi. Yüksek lisans tezi, Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi, (470709).*
- Bulut Acar, B. (2020). VVER-1200 tipi nükleer reaktörün kullanılmış yakıtları için depolama tesisi modeli geliştirilmesi ve maliyet analizi. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 027201, 20 (2), 362-373.
- Bilim, N. (2016). Türkiye'nin elektrik enerjisi üretimindeki dışa bağımlılığın azaltılması için uygulaması gereken politikalar. *Selçuk Üniversitesi Mühendislik Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 4(2), 146-154.
- Çaylı, A. ve Temizkan, Y. (2018). Kahramanmaraş bölgesi için seralarda örtü malzemesi ve ısı tasarruf önlemlerinin ısıtma yüküne etkisinin uzman sistem ile belirlenmesi. *KSÜ Tarım ve Doğa Dergisi*, 21(3), 312-322.
- Çengel, Y. A. ve Boles, M. A. (2008). *Mühendislik yaklaşımıyla termodinamik*. (5. Baskı), İzmir: Güven Kitabevi.
- Çukurçayır, M.A., Sağır, H. (2008). Enerji sorunu, çevre ve alternatif enerji kaynakları. *Selçuk Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 257–278.
- Düzcan, A. (2019). *Orhaneli termik santralinin eksergoekonomik ve eksergoçevresel analizi. Yüksek lisans tezi, Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi, (567316).*
- Geredelioglu, Ç. (2011). *Çayırhan termik santralinin enerji ve ekserji analizi. Yüksek lisans tezi, Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi, (295071).*
- İncekara, Ç.Ö. ve Oğulata, S.N. (2011). Enerji darboğazında ülkemizin alternatif enerji kaynakları. *Sosyal ve Beşerî Bilimler Dergisi*, 3(1), 1309-8012 (Online).
- Karagöz, M. (2020). *Türkiye'nin enerji açığı sorunu ve öne çıkan enerji kaynaklarının incelenmesi. Yüksek lisans tezi, Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi, (619657).*
- Karataşlı, M., Özer, T. ve Varinlioğlu, A. (2016). Enerji ve Çevre. *İstanbul Aydın Üniversitesi Dergisi*, 30, 103-124.
- Kaya, İ. S. (2012). Nükleer enerji dünyasında çevre ve insan. *Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 12(1), 71-90.

- Kaya, K. ve Koç, E. (2015). Enerji üretim santralleri maliyet analizi. *Mühendis ve Makina*, 56(660), 61-68.
- Kılıç, H. (2010). Akkuyu nükleer santrali soğutma ve çevresel sorunlar. *Elektrik Mühendisliği*, 438, 73-78.
- Koç, A., Yağlı, H., Koç, Y. ve Uğurlu İ. (2018). Dünyada ve Türkiye’de enerji görünümünün genel değerlendirilmesi. *Mühendis ve Makine*, 59(692), 86-114.
- Kovacı, T., Dikmen E. ve Şencan Şahin, A. (2018). Kurutma sistemleri, enerji tüketimleri ve ürün kalitesine etkileri ve örnek sistem tasarımı. *Teknik Bilimleri Dergisi*, 8(2), 25-39.
- Kıbaroğlu, M. (2018). Akkuyu'nun 40 yıllık macerası sona eriyor (mu?). *Stratejist*, 11, 10-17.
- Külekçi, Ö.C. (2009). Yenilenebilir enerji kaynakları arasında jeotermal enerjinin yeri ve Türkiye açısından önemi. *Ankara Üniversitesi Çevre Bilimleri Dergisi*, 1(2), 83-91.
- Meral, M.E., Teke, A. ve Tümay, M. (2009). Elektrik tesislerinde enerji verimliliği. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 14(1), 31-37.
- Mert, M.S. (2010). Bir güç santralinin ekserjik ve termoeconomik analizi. *Doktora Tezi, Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi*, (295798).
- Öngü, S. (2014). Nükleer reaktörler, yakıt tipleri ve Mersin Akkuyu nükleer santrali. *Yüksek lisans tezi, Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi*, (372603).
- Özdilim, M. (2017). Bir enerji santralinde buhar kazanı blöf atık ısısının geri kazanımı ve maliyet analizi. *Yüksek lisans tezi, Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi*, (478725).
- Paksoy, A.K. (2019). Gaz motorlu bir ısıl güç çevrim santralının atık ısı geri kazanımının termoeconomik analizi. *Yüksek lisans tezi, Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi*, (568405).
- Polatoğlu, A. (2016). Türkiye’de kurulması planlanan nükleer santrallerde kullanılacak nükleer yakıtların ve atıkların termoeconomik açıdan incelenmesi. *Yüksek lisans tezi, Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi*, (446486).
- Sevilgen, H.S. (2004). Kojenerasyon sistemin ekserjoekonomik analizi. *Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi*, 22(4), 234-248.
- Şahin, H.E. (2012). Kritik-üstü tip bir buharlı güç santralinin enerji ve ekserji analizi. *Yüksek lisans tezi, Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi*, (446486).

- T.C. Güney Ege Kalkınma Ajansı. (2018). *Meyve ve sebze kurutma tesisi ön fizibilitesi. Muğla, Muğla Yatırım Destek Ofisi.*
- T.C. Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu. (2021). *Doğal Gaz Piyasası 2020 Yılı Sektör Raporu. Ankara.*
- Terzi, R. (2016). *VVER nükleer güç santralinin ekserji analizi. Doktora tezi, Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi, (431156).*
- Turanlı Orakçı, Z.H. (2012). *Nükleer santrallerin maliyet analizi. Yüksek lisans tezi, Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi, (333068).*
- Turgut, K. (2011). Neden nükleer enerji?. *İdarecinin Sesi Dergisi*, 144, 62-65.
- Türkiye Bilimler Akademisi. (2019). *Nükleer enerji raporu (No: 29 ISBN: 978-605-2249-28-4). Ankara.*
- Tüysüz, C. (2013). *Bir kritik üssü termik santralde enerji ve ekserji analizi. Yüksek lisans tezi, Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi, (329636).*
- Toprak, S. ve Dal, S. (2017). Akkuyu Nuclear Power Plant Cost & Benefit Analysis. *Energy Policy Turkey*, 4, 85-91.
- Tozlu, A., Özahi, E. ve Abuşoğlu, A. (2018). Organik Rankine çevrimi entegre edilmiş S-CO₂ kullanılan bir gaz türbin çevriminin termodinamik ve termoeconomik analizi. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 33(3), 917-928.
- URL-1, Türkiye Atom Enerjisi Kurumu, Sıkça Sorulan Sorular, Yatırım Süresi ve Maliyet Bilgisi. 20 Temmuz 2021 tarihinde <https://www.taek.gov.tr/tr/sik-sorulan-sorular/136-nukleer-enerji-ve-nukleer-reaktorler-sss/854-nukleer-santrallerin-yatirim-suresi-ve-maliyeti-ne-kadardir.html> adresinden erişildi.
- URL-2, Sehatek Enerji Verimliliği Danışmanlık Ltd. Şti.. 05 Nisan 2021 tarihinde <https://sehatek.com.tr/blog/enerji-nedir-enerji-kaynaklari-nelerdir/> adresinden erişildi.
- URL-3, Nükleer Enerji ve Türkiye. (2017, Mayıs). Sektör değerlendirme raporu. 10 Mayıs 2022 tarihinde https://thinktech.stm.com.tr/uploads/docs/1608832916_stm-sektor-raporu-nukleer-enerji-ve-turkiye.pdf? adresinden erişildi.
- URL-4, Fizik Mühendisleri Odası, Nükleer Enerji Raporu. 13 Ağustos 2020 tarihinde [5161-nukleer3.pdf \(enerji.gov.tr\)](https://enerji.gov.tr/5161-nukleer3.pdf) adresinden erişildi.
- URL-5, Akkuyu NGS Elektrik Üretim Anonim Şirketi. 22.07.2020 tarihinde https://acikders.ankara.edu.tr/pluginfile.php/36500/mod_resource/content/1/10.%20HAFTA.pdf adresinden erişildi.

- URL-6, Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Akademik Veri Yönetim Sistemi Ders Notları. 18 Ağustos 2020 tarihinde
<https://avys.omu.edu.tr/storage/app/public/atalayt/105461/N%C3%BCkleer%20Santraller.pdf> adresinden erişildi.
- URL-7, Bozok Üniversitesi, Elektrik Enerjisi Üretim. 01 Ekim 2020 tarihinde
https://pbs.bozok.edu.tr/user_dosyalar/558-30256.pdf adresinden erişildi.
- URL-8, Slide Share, PowerPoint Presentation. 13 Ağustos 2020 tarihinde
<https://www.slideshare.net/BurakBerkBAKAYA/nkleer-enerji-78592004> adresinden erişildi.
- URL-9, NetinBag yazılımı. 08 Haziran 2021 tarihinde
<https://www.netinbag.com/tr/manufacturing/what-is-a-reactor-vessel.html> adresinden erişildi.
- URL-10, Akkuyu Nükleer Rosatom resmî web sitesi, Sık Sorulan Sorular. 16 Ağustos 2022 tarihinde <http://www.akkunpp.com/infocenter> adresinden erişildi.
- URL-11, Cazip Enerji T.A.Ş. 17 Şubat 2022 tarihinde
<https://www.encazip.com/nukleer-reaktor> adresinden erişildi.
- URL-12, Kılıç, H. (2004, 29 Ocak). VVER-1200 Reactors. 16 Haziran 2021 tarihinde
https://www.emo.org.tr/ekler/e3b054121774ab9_ek.pdf?tipi=2&turu=X&sube=6 adresinden erişildi.
- URL-13, Nükleer Akademi. 16 Şubat 2022 tarihinde <http://nukleerakademi.org/nukleer-santral-projeleri/akkuyu-projesi/> adresinden erişildi.
- URL-14, T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı resmî web sitesi. 02 Mart 2022 tarihinde
https://enerji.enerji.gov.tr/Media/Dizin/BHIM/tr/Alinin_Enerji_Seruvani/283763-eb_dergi1_2.pdf adresinden erişildi.
- URL-15, Akkuyu Nükleer Rosatom resmî web sitesi, Proje Hakkında. 16 Şubat 2022 tarihinde <http://www.akkunpp.com/nukleer-guc-santrali-ngs> adresinden erişildi.
- URL-16, Enerji Atlası, Nükleer, Akkuyu Nükleer Santrali. 13 Kasım 2021 tarihinde
<https://www.enerjiatlasi.com/nukleer/akkuyu-nukleer-santrali.html> adresinden erişildi.
- URL-17, Anadolu Ajansı resmî web sitesi. 16 Kasım 2021 tarihinde
<https://www.aa.com.tr/tr/ekonomi/akkuyu-nukleer-as-genel-muduru-akhundov-projeyi-anlatti/352761> adresinden erişildi.

- URL-18, Akkuyu Nükleer Rosatom resmî web sitesi, Proje Hakkında. 05 Ocak 2022 tarihinde <http://www.akkuyu.com/projenin-tarihcesi> adresinden erişildi.
- URL-19, Status report 93- VVER–1000 (V-466B) (VVER–1000 (V-466B)), Katalog verileri. 06 Ocak 2021 tarihinde [https://aris.iaea.org/PDF/VVER-1000\(V-466B\).pdf](https://aris.iaea.org/PDF/VVER-1000(V-466B).pdf) adresinden erişildi.
- URL-20, Türkiye Maden Mühendisleri Odası. 22 Aralık 2021 tarihinde https://www.maden.org.tr/resimler/ekler/5b83e3cd2b09cf4_ek.pdf adresinden erişildi.
- URL-21, Merkez Bankası resmî web sitesi. 9 Şubat 2022 tarihinde <https://www.verikaynagi.com/grafik/merkez-bankasi-aralik-ayi-abd-kuru-tahmini-ve-gerceklesen/#:~:text=Tahmini%20ve%20Ger%C3%A7ekle%C5%9Fen-,Merkez%20Bankas%C4%B1%202020%20y%C4%B1l%C4%B1n%C4%B1n%20aral%C4%B1k%20ay%C4%B1%20i%C3%A7in%20ABD%20dolar%20kuru,7%2C72%20TL%20olarak%20hesaplanm%C4%B1%C5%9Ft%C4%B1r.> adresinden erişildi.
- URL-22, Cazip Enerji T.A.Ş. 19 Mart 2022 tarihinde <https://www.encazip.com/elektrik-fiyatlari#1-kw-kac-tl-2022> adresinden erişildi.
- URL-23, Türkiye İstatistik Kurumu resmî web sitesi. 19 Haziran 2021 tarihinde <https://cip.tuik.gov.tr/#> adresinden erişildi. Ünal, F. (2009). *Bir termik santralin ekserji analizi. Yüksek lisans tezi, Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi, (268293).*
- Ünal, F. ve Özkan, B.D. (2014). Tunçbilek termik santralının enerji ve ekserji analizi. *Tesisat Mühendisliği*, 143, 5.
- Yazıcı, H. ve Selbaş, R. (2011). Bir buharlı güç santralının ekserji ve enerji analizi. *Selçuk-Teknik Dergisi*, 10(1), 117-135.
- Yücer, C. T. (2016). Ekserji analizi yöntemi kullanılarak bina ısıtma sistemlerinin incelenmesi. *Mühendis ve Makina*, 57(681), 59-64.

EKLER

Ek 1. EES Termodinamik Çözümler

```
P[1]=6270
T[1]=278,5
h[1]=Enthalpy(Water,T=T[1];P=P[1])
s[1]=Entropy(Water,T=T[1];P=P[1])
u [1]=IntEnergy(Water,T=T[1];P=P[1])
v[1]=Volume(Water,T=T[1];P=P[1])

T[2]=40
s[2]=s[1]
P[2]=Pressure(Water,T=T[2];s=s[2])
h[2]=Enthalpy(Water,T=T[2];s=s[2])
u [2]=IntEnergy(Water,T=T[2];s=s[2])
v[2]=Volume(Water,T=T[2];s=s[2])

P[3]=P[2]
T[3]=30
s[3]=Entropy(Water,T=T[3];P=P[3])
h[3]=Enthalpy(Water,T=T[3];P=P[3])
u [3]=IntEnergy(Water,T=T[3];P=P[3])
v[3]=Volume(Water,T=T[3];P=P[3])

P[4]=P[1]
s[4]=s[3]
T[4]=Temperature(Water,P=P[4];s=s[4])
h[4]=Enthalpy(Water,P=P[4];s=s[4])
u [4]=IntEnergy(Water,P=P[4];s=s[4])
v[4]=Volume(Water,P=P[4];s=s[4])

P[5]=15700
T[5]=321
s[5]=Entropy(Water,T=T[5];P=P[5])
h[5]=Enthalpy(Water,P=P[5];T=T[5])
u [5]=IntEnergy(Water,P=P[5];T=T[5])
v[5]=Volume(Water,P=P[5];T=T[5])
```

```
P[6]=P[5]
T[6]=291

s[6]=Entropy(Water,T=T[6];P=P[6])
h[6]=Enthalpy(Water,P=P[6];T=T[6])
u [6]=IntEnergy(Water,P=P[6];T=T[6])
v[6]=Volume(Water,P=P[6];T=T[6])
```

Ek 2.Doğal Gaz Dağıtım Şirketinden Veri Talep ve Cevap Yazısı

AKSA ÇUKUROVA DOĞAL GAZ DAĞITIM A.Ş.

Mersin Bölge Müdürlüğü'ne

Sn. İlgili,

2016 yılında Şirketiniz bünyesinde Kalite ve İş Süreçleri Uzmanı olarak başladığım göreve devam etmekteyim. Aynı zamanda Gümüşhane Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Enerji Sistemleri mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans öğrencisiyim.

Tez çalışmamda, hesaplamalarımda kullanılmak üzere 2020 yılı aylık konut ısıtma ve sıcak su tüketim verilerine ihtiyaç duymaktayım.

Verilerin temini ve kullanımında izninizi talep eder, gereğini tarafınızdan arz ederim.

Saygılarımla,

Adres: Hasanbey mahallesi cumhuriyet caddesi No: 85 A/B Merkez/Gümüşhane



Sayı : GDN.2021.T.AKS.22692

18.03.2021

Konu : 2020 Yılı aylık ısıtma ve sıcak su tüketim verileri Hk.

Sn. Elvin AĞTAŞ

Hasanbey Mahallesi Cumhuriyet Caddesi No:85 A/B Merkez/Gümüşhane

2020 yılı aylık konut ısıtma ve sıcak su kullanım yeri raporumuz yazımız ekinde paylaşılmıştır. Hesaplamalarınızda kullanabilirsiniz.

Akademik ve iş hayatınızda başarılar dileriz.

Saygılarımızla,

AKSA

EK-1: Isıtma amaçlı konut başına düşen 2020 yılı aylık doğal gaz tüketim miktarı

EK-2: Sıcak su kullanım amaçlı konut başına düşen 2020 yılı aylık doğal gaz tüketim miktarı

EK-1: Isınma amaçlı konut başına düşen 2020 yılı aylık doğal gaz tüketim miktarı

Aylar	sm ³
Ocak	212
Şubat	195
Mart	122
Nisan	60
Mayıs	23
Haziran	10
Temmuz	0
Ağustos	17
Eylül	0
Ekim	15
Kasım	10
Aralık	66
TOPLAM	739

EK-2: Sıcak su kullanım amaçlı konut başına düşen 2020 yılı aylık doğal gaz tüketim miktarı

Aylar	sm ³
Ocak	27
Şubat	39
Mart	30
Nisan	23
Mayıs	18
Haziran	7
Temmuz	1
Ağustos	12
Eylül	0
Ekim	12
Kasım	8
Aralık	17
TOPLAM	193

***Verilerimiz Abone Bilgi Yönetim Sistemimizden tüketim raporların alınmıştır.**

ÖZGEÇMİŞ

Elvin AĞTAŞ İlk, orta ve lise öğrenimi İskenderun’da tamamladı. 2012 yılında Gümüşhane Üniversitesi Makine Mühendisliği bölümünde lisans eğitimine başladı ve 2016 yılında mezun oldu. 2015 yılı bahar ve güz döneminde Avrupa Birliği Erasmus + Programı ile Polonya’da (Politechnica Opolska) iki dönem eğitim aldı. Lisans tezini erasmus öğreniminde ingilizce olarak, “Süreç Mühendisliği” üzerine tamamladı.

2016 Ekim ayından itibaren Aksa Doğal Gaz Dağıtım Anonim Şirketi’nde, Kalite ve İş Süreçleri Uzmanı olarak görev yapmaktadır. 2018 yılında Gümüşhane Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı’nda Yüksek lisans öğrenimine başladı. İyi seviyede İngilizce bilmektedir.

2018 yılında Kalite Yönetim Sistemi (ISO 9001:2015), Çevre Yönetim Sistemi (ISO 14001:2015) İç denetçi ve 2020 yılında Finansal Tablolar Okuma Yöntemleri eğitimini başarıyla tamamlayarak sertifikalarını almaya hak kazandı.