

T.C.
RECEP TAYYİP ERDOĞAN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

BİR MODÜLER NÜKLEER REAKTÖRÜN FARKLI
AKIŞKANLARLA SOĞUTULMASININ TERMODİNAMİK
PERFORMANSININ ARAŞTIRILMASI

MUHAMMED EMİN TOPAL

TEZ DANIŞMANI
PROF.DR. ADNAN MİDİLLİ

TEZ JÜRİLERİ
PROF. DR. SÜMER ŞAHİN
PROF. DR. TAHİR HİKMET KARAKOÇ

YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

RİZE-2019
Her Hakkı Saklıdır

T.C.
RECEP TAYYİP ERDOĞAN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**BİR MODÜLER NÜKLEER REAKTÖRÜN FARKLI AKIŞKANLARLA
SOĞUTULMASININ TERMODİNAMİK PERFORMANSININ
ARAŞTIRILMASI**

Prof. Dr. Adnan MİDİLLİ danışmanlığında, Muhammed Emin TOPAL tarafından hazırlanan bu çalışma, Enstitü Yönetim Kurulu kararıyla oluşturulan jüri tarafından 19/07/2019 tarihinde Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS** tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri	Unvanı Adı Soyadı
Başkan	: Prof. Dr. Adnan MİDİLLİ
Üye	: Prof. Dr. Sümer ŞAHİN
Üye	: Prof. Dr. Tahir Hikmet KARAKOÇ

İmzası




Doç. Dr. Ferhat KALAYCI
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ MÜDÜRÜ

ÖNSÖZ

Modüler nükleer reaktörler, daha ileri teknolojiye sahip olması, daha güvenli olması, taşınabilir uygulamalar için uygun olması, daha az yer kaplaması ve daha az maliyetle inşa edilmesi, yenilenebilir enerji sistemlerine göre yıllık çalışma süresinin daha fazla olması, fosil yakıtlı konvansiyonel sistemlere göre daha temiz ve sürdürülebilir olması ve daha az yakıtle çalışmasından dolayı, araştırmacıların odağı haline gelmiştir. Yapılan araştırmalar, özellikle birden fazla soğutucu akışkan ile soğutulan modüler nükleer reaktörlerin, tek akışkan ile soğutulan sistemlerden soğutulma performansı ve elektrik üretimi açısından nasıl bir etki göstereceği araştırma konusu olarak gündeme gelmektedir. Bu düşünceler ışığında bu çalışmada, ikincil soğutucu akışkan süperkritik karbondioksit, süperkritik su, LiF-NaF-KF tuzu kullanılarak üç farklı modda soğutulan bir modüler LiF-BeF₂ tuz soğutmalı nükleer reaktörün soğutulmasının ve güç üretiminin termodinamik performansının araştırılması amaçlanmıştır.

Yüksek lisans programı süresince çalışmalarımın tüm aşamalarında engin bilgi ve tecrübeleriyle daima bana yol gösteren, daha da önemlisi bilimsel ve teknik anlamda ufkumu açan değerli tez danışmanım Prof. Dr. Adnan MİDİLLİ' ye teşekkür eder, saygı ve hürmetlerimi sunarım.

Tezimin pek çok aşamasında fikir alışverişinde bulunduğum kıymetli çalışma arkadaşım Arş. Gör. Mert ÖZSABAN'a da ayrıca teşekkür ederim.

Tez çalışmalarım gerçekleştirdiğim ve imkanlarından yararlandığım Makine Mühendisliği Bölümü *İnovasyon, Dizayn ve Analiz Laboratuvarı (İDEA-L)*'nin yönetimine çok teşekkür ederim.

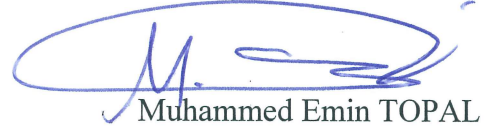
Tez çalışmalarım süresince bilgi ve desteklerini esirgemeyen Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nın tüm akademisyenlerine ve çalışanlarına sonsuz teşekkür ederim.

Ayrıca, tez çalışmam süresince benden her türlü maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen anneme, babama ve kardeşime şükranlarımı sunarım.

Muhammed Emin TOPAL

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Tarafımdan hazırlanan “Bir Modüler Nükleer Reaktörün Farklı Akışkanlarla Soğutulmasının Termodinamik Performansının Araştırılması” başlıklı bu tezin, Yükseköğretim Kurulu Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiği Yönergesindeki hususlara uygun olarak hazırladığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal işlemi kabul ettiğimi beyan ederim. 17/06/2019



Muhammed Emin TOPAL

Uyarı: Bu tezde kullanılan özgün ve/veya başka kaynaklardan sunulan içeriğin kaynak olarak kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

ÖZET

BİR MODÜLER NÜKLEER REAKTÖRÜN FARKLI AKIŞKANLARLA SOĞUTULMASININ TERMODİNAMİK PERFORMANSININ ARAŞTIRILMASI

Muhammed Emin TOPAL

**Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı
Yüksek Lisans Tezi
Danışmanı: Prof. Dr. Adnan MİDİLLİ**

Bu tezin amacı, modüler bir nükleer reaktörün farklı ikincil soğutucu akışkanlarla soğutulmasının termodinamik performansını araştırmaktır. Bu kapsamda, seçilen 8,1 MW ısı gücünde ve temel soğutucu akışkan olarak LiF-BeF₂ tuzu içeren bir modüler nükleer reaktörün üç farklı modda soğutma ve güç üretim çevrimleri tasarlanmıştır. Tasarlanan modlar; i) Yardımcı soğutucu akışkan olarak s-CO₂ kullanılması, ii) Yardımcı soğutucu akışkan olarak s-Su kullanılması, iii) Yardımcı soğutucu akışkanlar olarak s-CO₂, s-Su ve FLiNaK'ın entegre kullanımı. Bu çalışma modları için uygun çevrimler geliştirilerek enerji ve ekserji analizleri yapılmıştır. Bu çerçevede, Oak Ridge Ulusal Laboratuvarı'nda testleri yapılan 8,1 MW'lık nükleer reaktörün ısı kapasitesi referans olarak alınmıştır. s-CO₂'li çevrim için türbin işletme parametreleri 22,1 MPa ve 883 K; s-Su'lu çevrim için türbin işletme parametreleri 25 MPa, 1050 K alınmıştır. Sonuç olarak; yapılan hesaplamalar neticesinde, birinci modda %42,3 enerji verimi, %54,9 ekserji verimi, ikinci modda %40,1 enerji verimi, %52,01 ekserji verimi ve üçüncü modda %46,79 enerji verimi, %60,7 ekserji verimi olduğu hesaplanmıştır. Dolayısıyla, üçüncü mod tasarım bakımından yeni ve performans bakımından yüksek olmasına rağmen imalat ve işletim güvenliği bakımından ayrı bir çalışma kapsamında değerlendirilmelidir.

2019, 73 sayfa

Anahtar Kelimeler: Modüler Nükleer Reaktör, Enerji, Ekserji, Süperkritik akışkan, Erimiş Tuz

ABSTRACT

INVESTIGATION OF THERMODYNAMIC PERFORMANCE OF COOLING A MODULAR NUCLEAR REACTOR WITH DIFFERENT SECONDARY COOLANTS

Muhammed Emin TOPAL

**Recep Tayyip Erdogan University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Mechanical Engineering
Master Thesis
Supervisor: Prof. Dr. Adnan MIDİLLİ**

The aim of this thesis is to investigate the thermodynamic performance of cooling a modular nuclear reactor with different secondary coolants. In this regard, the cooling and power generation cycles of a 8.1 MW thermal power-modular nuclear reactor with LiF-BeF₂ salt as the main coolant are designed. Designed modes are; i) Utilization of s-CO₂ as secondary coolant, ii) Utilization of s-Water as secondary coolant, iii) Integrated utilization of s-CO₂, s-Water and FLiNaK as additional coolants. By developing the suitable cycles for these operation modes, energy and exergy analyzes are performed. In this context, the thermal capacity of the nuclear reactor used in the study is taken to be 8.1 MW referring the small modular nuclear reactor at Oak Ridge National Laboratory. Furthermore, turbine operating parameters for s-CO₂ cycle are taken to be 22.1 MPa and 883 K; 25 MPa, 1050 K for s-water cycle. Consequently, energy and exergy efficiencies are respectively calculated to be 42.3% and 54.9% for the first mode; 40.1% and 52.01% for the second mode; 46.79% and 60.7% for the integrated mode. Thus, at the end of the calculations for energy and exergy calculations it can be said that although the third mode is a new design and has high performance, it is suggested that, in terms of manufacturing and operational safety, a new comprehensive study should be conducted for future studies.

2019, 73 pages

Keywords: Modular Nuclear Reactor, Energy, Exergy, Supercritical fluids, Molten salt.

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ	I
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	II
ÖZET	III
ABSTRACT.....	IV
İÇİNDEKİLER	V
ŞEKİLLER DİZİNİ	VII
TABLolar DİZİNİ.....	VIII
SEMBOLLER ve KISALTMALAR DİZİNİ	IX
1. GENEL BİLGİLER	1
1.1. Giriş	1
1.2. Tez Çalışmasının Amacı ve Önemi	2
1.3. Nükleer Enerji ve Santraller Hakkında Genel Bilgiler	3
1.3.1. Nükleer Enerji.....	3
1.3.2. Nükleer Santrallerin Sınıflandırılması	4
1.3.3. Bir Nükleer Santrali Oluşturan Temel Elemanlar.....	5
1.3.4. Yakıt.....	5
1.3.5. Soğutucu Akışkan Türleri ve Soğutma Çevrimleri.....	6
1.3.6. Dördüncü Nesil Reaktörler	10
1.4. Enerji ve Ekserji Analizinin Gereksinimi	14
1.5. Literatür Özeti.....	14
2. YAPILAN ÇALIŞMALAR.....	22
2.1. Teorik Çalışmalar	22
2.1.1. Genel Kabuller	22
2.1.2. Sistemde Etkili Büyüklükler	24
2.1.2.1. Sabit Büyüklükler	24
2.1.2.2. Hesaplanabilen büyüklükler	25
2.1.3. Bir Modüler Nükleer Reaktörün Farklı İkincil Soğutucu Akışkanlarla Soğutulması ve Güç Üretimi Modları Akış Şeması	26
2.2. Termodinamik Çalışmalar	33
2.2.1. Üç Farklı Moddan Güç Üretimi İçin Hesaplamalar.....	33
2.2.1.1. Yakıt Miktarı.....	33
2.2.1.1.1. Örnek Hesaplama.....	34

2.2.1.2.	FLiBe ve FLiNaK tuzlarının entalpisinin ve entropisinin hesaplanması.....	34
2.2.1.3.	Sıkıştırılabilirlik Faktörü.....	35
2.2.1.3.1.	Örnek Hesaplama.....	36
2.2.2.	Enerji ve Ekserji Analizi.....	36
2.2.2.1.	Reaktörün Enerji ve Ekserji Analizi	39
2.2.2.2.	Süperkritik Türbinde Enerji ve Ekserji Analizi	42
2.2.2.3.	Buhar Türbininde Enerji ve Ekserji Analizi	43
2.2.2.4.	Kompresörde Enerji ve Ekserji analizi	45
2.2.2.5.	Pompada Enerji ve Ekserji Analizi	46
2.2.2.6.	Isı Değiştirici ve Reküperatörde Enerji ve Ekserji Analizi.....	47
2.2.2.7.	Tüm Sistemin Ekserji Verimi	48
3.	BULGULAR.....	52
3.1.	Mod-1 ile İlgili Bulgular	52
3.2.	Mod-2 ile İlgili Bulgular	53
3.3.	Mod-3 ile İlgili Bulgular	54
3.4.	Modların Karşılaştırılması	56
4.	TARTIŞMA ve SONUÇLAR.....	62
5.	ÖNERİLER.....	65
	KAYNAKLAR	66
	ÖZGEÇMİŞ	73

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. s-CO ₂ soğutmalı tuz reaktörü.....	27
Şekil 2. s-Su soğutmalı tuz reaktörü	29
Şekil 3. s-CO ₂ -s-Su-FLiNaK soğutmalı tuz reaktörü	31
Şekil 4. MOD-1 reaktör kabı kontrol hacmi.....	39
Şekil 5. MOD-2 reaktör kabı kontrol hacmi.....	40
Şekil 6. MOD-3 reaktör kabı kontrol hacmi.....	41
Şekil 7. Süperkritik türbinin kontrol hacmi	43
Şekil 8. Buhar türbinin kontrol hacmi	45
Şekil 9. Kompresörün kontrol hacmi	46
Şekil 10. Isı değıştirici için kontrol hacmi.....	47
Şekil 11. Reküperatör için kontrol hacmi.....	48
Şekil 12. Birinci modun kontrol hacmi	49
Şekil 13. İkinci modun kontrol hacmi	49
Şekil 14. Üçüncü modun kontrol hacmi	50
Şekil 15. Birinci moddaki soğutucu akışkan s-CO ₂ için P-v diyagramı.....	57
Şekil 16. Birinci moddaki soğutucu akışkan s-CO ₂ için T-s diyagramı	57
Şekil 17. İkinci moddaki soğutucu akışkan s-CO ₂ için P-h diyagramı	58
Şekil 18. İkinci moddaki soğutucu akışkan s-CO ₂ için T-s diyagramı	59

TABLÖLER DİZİNİ

Tablo 1. Soğutucu akışkanların bazı özellikleri	9
Tablo 2. Literatürdeki çalışmaların özeti.....	19
Tablo 3. Sabit büyüklükler.....	24
Tablo 4. Hesaplanabilen büyüklükler.....	25
Tablo 5. s-CO ₂ soğutmalı tuz reaktörü için çevrimdeki basınç ve sıcaklıklar.....	28
Tablo 6. s-Su soğutmalı tuz reaktörü için çevrimdeki basınç ve sıcaklıklar.....	30
Tablo 7. s-CO ₂ -s-Su-FLiNaK soğutmalı tuz reaktörü için çevrimdeki basınç ve sıcaklıklar.....	32
Tablo 8. Birinci modun kontrol hacimleri ve enerji, ekserji denklemleri.....	50
Tablo 9. İkinci modun kontrol hacimleri ve enerji, ekserji denklemleri.....	51
Tablo 10. Sistem verimi	60
Tablo 11. Üretilen elektrik miktarları.....	60
Tablo 12. Sistemdeki bileşenlerin ısı/iş üretimi/sarfiyatı.....	61

SEMBOLLER ve KISALTMALAR DİZİNİ

ρ^T	Akışkan Yoğunluğu
a	Benedict-Webb-Rubin Eşitliği Sabiti
A_0	Benedict-Webb-Rubin Eşitliği Sabiti
$A_{m,l}$	Tuz Türüne Bağlı Sabit Katsayı
AN	Azotun Atom Ağırlığı
AU	Uranyumun Atom Ağırlığı
b	Benedict-Webb-Rubin Eşitliği Sabiti
B_0	Benedict-Webb-Rubin Eşitliği Sabiti
B_4C	Boron Karbid
$B_{m,l}$	Tuz Türüne Bağlı Sabit Katsayı
c	Benedict-Webb-Rubin Eşitliği Sabiti
C_0	Benedict-Webb-Rubin Eşitliği Sabiti
$C_{m,l}$	Tuz Türüne Bağlı Sabit Katsayı
c_p	Isı Kapasitesi
$D_{m,l}$	Tuz Türüne Bağlı Sabit Katsayı
FLiBe	LiF-BeF ₂ Tuzu
FLiNaK	LiF-NaF-KF Tuzu
g	Yer Çekimi İvmesi
h	Entalpi
h_f	Doymuş Sıvı Entalpisi
h_{fg}	Buhar Entalpisi
h_0	Referans Nokta Entalpisi
k	İzotermal Sıkıştırılabilirlik
KF	Kapasite Faktörü
kg/s	Kilogram/saniye
SMR	Küçük Modüler Nükleer Reaktör
MJ	Megajoule
MW	Megawatt
MW_{tr}	Megawatt Termal Güç
P_0	Referans Nokta Basıncı
P_g	Giriş Basıncı

Q	Birim Zamandaki Net Isı Geçişi
R	Gaz Sabiti
R_u	Üniversal Gaz Sabiti
s	Entropi
s_f	Doymuş Sıvı Entropisi
s_{fg}	Buhar Entropisi
s_g	Doymuş Buhar Entropisi
s_0	Referans Nokta Entropisi
$S\text{-CO}_2$	Süperkritik Karbondioksit
$S\text{-Su}$	Süperkritik Su
T_0	Referans Nokta Sıcaklığı
T_g	Giriş Sıcaklığı
TG	Termal Güç
TWh	Terawatt-saat
V	Akış Hızı
W_{kh}	Kontrol Hacmindeki Net İş
Z	Sıkıştırılabilirlik Faktörü
z	Yükseklik
Z_k	Kompresör İçin Sıkıştırılabilirlik Faktörü
Z_t	Türbin İçin Sıkıştırılabilirlik Faktörü
ξ_r	Reaktörün Verimi
a	Benedict-Webb-Rubin Eşitliği Sabiti
γ	Benedict-Webb-Rubin Eşitliği Sabiti
ρ	Yoğunluk
ξ_{ex}	Sistemin Ekserji Verimi
$Ex_{kullanılan\ yakıt}$	Kullanılan Yakıtın Ekserjisi

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Enerji üretiminde artan maliyet ve sürdürülebilirlik gereksinimi gibi faktörler, enerji sektörünü farklı metotlar geliştirmeye yöneltmiştir. Günümüzde enerji sarfiyatında yoğun ve yaygın bir şekilde kullanılmakta olan fosil kökenli yakıtların (doğal gaz, kömür ve petrol gibi) ekonomik olarak kullanılabilen rezervlerinin yakın bir gelecekte ciddi oranda azalacağı tahmin edilmektedir (Kandiyoti vd., 2017; Höök ve Tang, 2013; Day ve Day, 2017; Chiari ve Zecca, 2011). Bu, Dünya'nın enerji arz-talep dengesinin sağlanması için önemli oranda enerji ihtiyacına işaret etmektedir. Ayrıca, fosil kökenli yakıtların doğaya verdiği zararlar sonucu çevre ve hava kirliliği oluşmakta bu da insan hayatına olumsuz etki etmektedir (Cui vd., 2019; Billig vd., 2019). Bu durum, bilim adamlarını farklı enerji çözümlerini, teknolojilerini ve yöntemlerini geliştirmeye/ortaya koymaya zorlamıştır. Dolayısıyla bu durum, fosil kökenli kaynaklar yanında yenilenebilir/sürdürülebilir olan kaynakların da kullanılması gerekliliğini ortaya çıkarmıştır (Stanek vd., 2019; Inayat ve Raza, 2019; Karasmanaki ve Tsantopoulos, 2019). Bu kaynaklara (güneş, rüzgâr, jeotermal, nükleer) bağlı olarak çalışan teknolojilerin verimli, çevre dostu ve ekonomik olabilmesi için yeni nesil çalışma yöntemlerine ihtiyaç duyulmaktadır.

Fosil kökenli kaynakların oluşturduğu kirlilik ve canlı hayatı üzerindeki olumsuzluklar, temiz ve sürdürülebilir enerji kaynaklar yardımıyla kısmen veya tamamen azaltılabilir. Bu temiz ve sürdürülebilir enerji kaynaklardan biri de nükleer enerjidir.

Yapılan literatür araştırmalarından görüldüğü üzere, dünya üzerinde pek çok devlet enerji ihtiyacını nükleer santrallerden karşılamaktadır. Örneğin; komşumuz Bulgaristan sahip olduğu iki nükleer reaktörle ülkenin enerji ihtiyacının %35'ini karşılamaktadır (Tchalakov ve Hristov, 2019; Tchalakov ve Mitev, 2019). Ülkemiz de son yıllarda nükleer enerjiye yönelmiş ve bu amaçla Mersin-Akkuyu santrali ile Sinop'ta kurulacak olan santral için çalışmalara ve inşaa sürecine başlamıştır. Fosil yakıtlı santrallere göre çok daha temiz bir enerji türü olan nükleer enerji, gelişen teknoloji, yeni teknolojik tasarımlar ve entegre soğutma sistemleri yardımıyla gittikçe daha güvenli hale gelmektedir.

Yeni nesil enerji üretim tesisleri olan küçük modüler reaktörlerin, mevcut nükleer güç santrallerine göre kapalı döngü olması ve daha kolay soğutulması bakımından daha güvenli olduğu söylenebilir. Bu tür tesisler daha düşük maliyetle daha sınırlı bir alanda kurulup daha kolay işletilebilir. Bu önemli avantaj, özellikle yer sıkıntısı olan ülkelerde bu tür santrallerin daha kolay uygulanabilmesini kolaylaştırır (Black vd., 2019; Devanand vd., 2019; Vogel ve Quinn, 2017).

Büyük bir alan kaplayan konvansiyonel nükleer santraller soğutma açısından su kaynaklarına yakın mesafede olmalıdır (Ingersoll, 2016). Ancak bu şartları her zaman sağlamak mümkün olmaz. Her ne koşulda olursa olsun elektrik ihtiyacını karşılamak durumunda olan günümüz dünyası bir alternatif olarak daha küçük ölçekli nükleer santrallerden de yararlanabilir. Bu amaca hizmeti dokunur düşüncesiyle bu konuyu bir yüksek lisans tezi çerçevesinde inceleyip literatüre katkı sunmak amaçlanmıştır. Çalışmanın konusu olarak seçilen küçük ölçekli, daha az yer kaplayan, kapalı döngü soğutma sistemlerine sahip ve literatürde küçük modüler nükleer reaktörler (SMR) olarak geçen bu tip nükleer güç santralinin sürdürülebilir enerji üretiminde oldukça iyi bir çözüm olduğu düşünülmektedir. Bu düşünceler ışığında, tez kapsamında, LiF-BeF₂(FLiBe) tuz soğutmalı modüler bir nükleer reaktörün farklı ikincil soğutucu akışkanlarla soğutulması ve güç üretimi için üç farklı mod tasarlanacak ve termodinamik bakımdan incelenecektir. Burada şunu da ifade etmek gerekir ki, yapılan literatür araştırmaları tez kapsamında odaklanılan bu konunun bilimsel orijinalliğine işaret etmektedir.

1.2. Tez Çalışmasının Amacı ve Önemi

Bu tez çalışması kapsamında ele alınan FLiBe birincil soğutucu akışkanı ile soğutulan modüler nükleer reaktörün ısı kapasitesi neden 8.1 MW termal seçildi? Bu tez çalışması kapsamında ele alınan modüler nükleer reaktörün ısı kapasitesi, 1957-1976 yılları arasında molten salt programı kapsamında Oak Ridge’de deneysel olarak çalıştırılan erimiş tuz reaktörünün ısı kapasitesi (yaklaşık 8 MWth) olarak alınmıştır (Haubenreich ve Engel, 1970; URL-1).

Bu tez çalışmasının amacı; FLiBe birincil soğutucu akışkanı ile soğutulan bir modüler nükleer reaktörün süperkritik karbondioksit, süperkritik su ve LiF-NaF-

KF(FLiNaK) gibi ikincil soğutucu akışkanlarla üç farklı çevrimde soğutulmasının ve güç üretiminin termodinamik performansını araştırmaktır. Tasarlanan modeller üzerinde enerji ve ekserji analizi çalışmaları yapılmıştır. Çalışma parametrik odaklıdır. Bu tez çalışması kapsamında, dördüncü nesil tuz soğutmalı modüler bir nükleer reaktör tipi üzerinde özellikle soğutma entegrasyonu ile ilgili farklı entegre bir soğutma ve güç üretim modeli ortaya konulmuştur. Geliştirilen üçüncü modda üç akışkanlı iki farklı soğutma çevrimiyle reaktörün birincil soğutucu akışkanı olan FLiBe tuzu soğutulmaktadır. FLiBe birincil soğutucu akışkanı ile soğutulan modüler nükleer reaktörde aynı anda hem soğutma hem de güç üretimi gerçekleştirilmektedir. Endüstriyel uygulamalarda, erimiş flüorür tuzları, nükleer ısı kaynağı ile enerji üretimini gerçekleştirecek olan akışkan arasında ikincil bir devrede tercih edilen bir soğutma sıvısıdır. Dolayısıyla bu çalışmada erimiş tuz FLiNaK ikincil soğutucu akışkan olarak kullanılmıştır. Sistemde meydana gelebilecek herhangi bir arıza durumunda modlardan biri devre dışı kalsa bile elektrik üretimi devam edebilecektir. Bu da sürdürülebilir elektrik üretimi bakımından ortaya yeni bir anlayış koymaktadır.

Tez çalışmasının, aşağıda sıralanan bilimsel, akademik ve teknolojik yararları sağlayacağı beklenmektedir.

* Modüler bir nükleer reaktörün farklı ikincil soğutucu akışkanlarla soğutulması ve güç üretimi üzerine gerçekleştirilen enerji ve ekserji çalışmaları, literatüre katkı anlamında termodinamik açıdan bilimsel nitelikli bir referans oluşturması,

* Modüler nükleer reaktörlerin soğutulması üzerine yapılan bilimsel ve teknolojik çalışmalara yeni bir özellik katması yapılan çalışmanın önemini ortaya koymaktadır.

1.3. Nükleer Enerji ve Santraller Hakkında Genel Bilgiler

1.3.1. Nükleer Enerji

Nükleer enerjide temel amaç, kütle numarası büyük olan bir atomu nötron bombardımanıyla parçalayarak ortaya iki küçük atom ve büyük bir fisyon enerjisi çıkarmaktır. Maddenin görünenden daha küçük parçalara ayrılabilceği fikri ilk olarak

eski Yunan'a kadar dayanmaktadır. İlk olarak Democritus tarafından ortaya atılan bu fikir ve sonrasındaki yaklaşık 2400 yıllık tarihi gelişimle birlikte günümüzdeki modern nükleer reaktörler yapılmıştır (Krane,1988). Günümüzde nükleer reaktörlerin kullanılmasıyla büyük oranda güç üretimi gerçekleştirilmektedir. Önemli bir bilgi olarak; Dünya Nükleer Birliği verilerine göre, son yayınlanan raporda 2017 yılında dünya üzerindeki tüm nükleer reaktörlerden, yıllık 2506 TWh elektrik üretimi gerçekleştirilmiştir ve elektrik üretimi son 10 yılda sürekli artan bir grafik izlemektedir (World Nuclear Association, 2019).

Nükleer santrallerden enerji elde edebilmek için yapılan çalışmalar her geçen gün artmaktadır. Dünyadaki toplam elektrik üretiminin %11' i nükleer santrallerden sağlanmaktadır (Pioro ve Duffey, 2019). Bu oran bazı ülkelerde çok daha yüksek boyutlardadır. Özellikle, Fransa'da üretilen elektrik enerjisinin %72' si nükleer santraller vasıtasıyla gerçekleştirilmektedir. Ermenistan ve Bulgaristan'da ise elektrik ihtiyacının yaklaşık %35'lik kısmı nükleer santraller ile karşılanmaktadır (Tchalakov, 2019). Türkiye'deki duruma gelince, Mersin'de inşası devam eden Akkuyu nükleer santrali yanında Sinop ve Trakya çevresinde iki ayrı nükleer santralin daha planlaması devam etmektedir. Bunlardan 2026 yılında tam kapasite ile devreye girmesi beklenen Akkuyu nükleer santrali, Türkiye'nin yıllık elektrik ihtiyacının yaklaşık %7,7'sini karşılaması beklenmektedir (Pasaoglu vd., 2018).

Nükleer santral inşasında gerekli yer temininde karşılaşılan zorluklar, maliyet faktörleri ve daha pek çok etken dikkate alındığında mevcut duruma daha verimli alternatiflerin sunulması gerekliliği ortaya çıkmaktadır. Bu amaç doğrultusunda, yakın bir gelecekte küçük ölçekli modüler nükleer reaktörlerin çok önemli bir alternatif olacağı düşünülmektedir.

1.3.2. Nükleer Santrallerin Sınıflandırılması

Uluslararası Enerji Ajansına göre 300 MWe' a kadar elektrik enerjisi üreten nükleer reaktörler küçük ölçekli modüler nükleer reaktörler olarak tanımlanmaktadır (IAEA, 2014). Nükleer santraller kurulu güce göre, soğutucu akışkan türüne göre, kullanım amacına göre, nesillere göre çeşitli şekillerde sınıflandırılabilir. Soğutucu akışkan

türüne göre reaktörler (IEE, 2005; Bodansky, 2005; Ferguson, 2011; URL-2, 2019): i) Su soğutmalı reaktörler, ii) Gaz soğutmalı reaktörler, iii) Sıvı metal soğutmalı reaktörler, iv) Tuz soğutmalı reaktörler şeklinde sıralanabilir. Kullanım amacına göre nükleer reaktörler (IEE, 2005; Bodansky, 2005; Ferguson, 2011; URL-2, 2019): i) Güç reaktörleri (Isı ve/veya elektrik elde etmek için kullanılırlar), ii) Araştırma reaktörleri (Araştırma amacıyla ısı veya nötron akısı elde etmek için kullanılırlar), iii) Üretim reaktörleri (Üretilen akı ile izotop üretimi yapmak için kullanılırlar). Nesillere göre reaktörler (IEE, 2005; Bodansky, 2005; Ferguson, 2011; URL-2, 2019): i) Birinci nesil nükleer reaktörler, ii) İkinci nesil nükleer reaktörler, iii) Üçüncü nesil nükleer reaktörler ve 3+ nesil nükleer reaktörler, iv) Dördüncü nesil nükleer reaktörler.

Bu tez çalışması kapsamında, küçük ölçekli FLiBE tuz soğutmalı modüler bir nükleer reaktörün farklı ikincil akışkanlarla soğutulması ve güç üretimi üzerine çalışmalar yapılmıştır.

1.3.3. Bir Nükleer Santrali Oluşturan Temel Elemanlar

Genel olarak nükleer santral, reaktör kabı, yakıt demetleri, kontrol çubuğu, buhar üretici, türbin, jeneratör, kompresör, pompa ve ısı değiştiricilerden oluşur (Baratta ve Lamarsh, 2001; Krane, 1987; Ferguson, 2011; Masterson, 2016).

1.3.4. Yakıt

Nükleer santrallerde temel yakıt olarak uranyum kullanılmaktadır. Uranyum, doğal ve zenginleştirilmiş uranyum olmak üzere iki sınıfa ayrılmıştır. Bu konuda literatürde oldukça fazla bilgi bulunmaktadır (Hore-Lacy, 2007; 2016; Wilks, 2012; Harding, 2016).

Bu tez çalışması kapsamında ele alınan tuz soğutmalı modüler nükleer reaktör' de kullanılacak yakıt olarak Uranyum Nitrit (UN) seçilmiştir. Nitrit yakıtlar üstün fiziksel ve termal performans özelliklerinden dolayı nükleer reaktörlerden elektrik üretiminde uygulama alanı bulmuşlardır (Castro vd., 2019; Hassan vd., 2019). UN yakıtların geliştirme ve kullanma çalışmaları 1970'li yıllara dayanmaktadır. UN üretimi için bir başka nükleer yakıt olan Uranyum dioksit(UO_2) üzerinde birkaç basamakta işlemler

yapılarak yakıt üretimi gerçekleştirilir. Bu basamaklar şu şekilde gerçekleşir. İlk olarak UO_2 ve karbon tozları tepkimeye sokularak buradan UC ve karbon monoksit (CO) çıkışı olur. Sonrasında bu tepkime gerçekleşirken fırına %6'luk N_2 ve H_2 gazları verilerek UN elde edilir (Matthews vd., 1987). Bu işlem gerçekleştirildikten sonra elde edilen UN tozları bir araya getirilip preslenip, fırınlanıp ve Trikloretillen (C_2HCl_3), aseton (C_3H_6O) ve etil alkol (C_2H_5OH) banyosunda yıkandıktan sonra vakumlanarak nükleer reaktörde kullanılacak yakıt çubuklarının içine doldurulmak üzere UN peletleri haline getirilir (Ol, vd., 2012).

1.3.5. Soğutucu Akışkan Türleri ve Soğutma Çevrimleri

Reaktörün kor bölgesinde gerçekleşen nötron bombardımanı sonrası yakıt çubuklarından ortaya çok büyük bir ısı çıkar. Bu ısının reaktörden uzaklaştırılması için farklı tip soğutucular kullanılmaktadır. Bu soğutucular; su, erimiş metal, erimiş tuz, gaz ve hidrokarbonlar olmak üzere beş ana başlıkta toplanabilir.

Nükleer reaktörlerin daha güvenli olması, çevreye zararının indirgenmesi gibi doğayı ve insan hayatını en az etkileyecek şekilde reaktörler için soğutma suyu ile ilgili araştırmalar yapılmaktadır (Environment Agency, 2017). Reaktörde açığa çıkan ısıyı uzaklaştırıp, yakıt çubuklarının erimesini engelleyen bununla birlikte güç üretimini sağlayan soğutucu akışkanların nükleer reaktörlerde en çok kullanılan türü olan su; hafif su ve ağır su olmak üzere ikiye ayrılır (Krane, 1987). Hafif su olarak tanımlanan soğutucu akışkan H_2O 'dur. Yani hafif su soğutmalı reaktörlerde normal su kullanılmaktadır. Ağır su soğutmalı reaktörlerde ise Döteryumoksit (D_2O) kullanılmaktadır. D_2O ağır su olarak tanımlanmıştır (Masterson, 2016). Bunun nedeni bu bileşiğin eldesinde hidrojenin kütle numarası olarak daha ağır bir izotopu olan döteryum elementinin kullanılmasıdır. Basınçlı su reaktörlerinde ve kaynamış su reaktörlerinde hafif su kullanılmaktadır. Kaynamış su reaktörlerinde su kaynarken, basınçlı su reaktörlerinde yüksek basınç sonucu su kaynamaz. Ağır suyun elde edilmesi daha zor ve maliyetlidir (Masterson, 2016). Bundan dolayı dünya üzerindeki su soğutmalı reaktörlerin çoğu hafif su soğutucu akışkanı ile soğutulmaktadır. Kanada tipi nükleer reaktör olan CANDU reaktörlerinin de ikinci döngüsünde hafif su kullanılmaktadır. Ancak reaktörün kor bölgesinin soğutulmasında D_2O yani ağır su kullanılmaktadır. Ağır su, kullanmak daha avantajlıdır.

Bunun nedeni döteryumun absorpsiyon kesitinin hidrojeninkinden üç kat daha büyük olmasıdır (Arif ve Zaheer, 2015). Buna karşın ağır suyun eldesi hafif suya göre daha maliyetlidir. Dördüncü nesil reaktörlerde su süperkritik seviyenin üzerine çıkarılarak soğutma sağlanmaktadır. Yüksek basınç ve sıcaklık gerektiğinden maliyetlidirler.

Soğutucu akışkan tiplerinden bir başkası ise erimiş metaldir. Erimiş metal sınıfına sodyum, kurşun, kurşun-bizmut ötektik soğutucu akışkanları girmektedir.

Soğutucu akışkanlardan biri olan sodyum, nötron değişimini önler ve çok verimli bir ısı transfer ortamı sağlar. Sodyumun erime noktası 97,72°C ve kaynama noktası 883°C'dir. Sodyumun kaynama noktası reaktörün çalışma sıcaklığından çok daha yüksek olduğundan ve parçalarında paslanma yapmadığından yüksek basınç uygulanmasına gerek yoktur (IRSN, 2018). Sodyum çeliği hiçbir şekilde aşındırmaz ve çok çeşitli yapısal malzemelere izin vererek birçok nükleer yakıtla uyumlu olarak sistemde bulunur. Atmosfer basıncında çalışmaktadır. Sodyum, suya göre reaktörlerde daha yüksek bir termodinamik verim sağlar (Fanning, 2007). Elektriksel olarak iletken olan erimiş sodyum, elektromanyetik pompalarla pompalanabilir. Sodyumun dezavantajı ise su ile temas ederse ve reaksiyon sonucu ortaya çıkan hidrojen hava ile temas ederse yanar. Sodyum sadece 15 saatlik bir yarı ömre sahiptir (Fanning, 2007).

Kurşun düşük nötron absorpsiyonu ve yansıtması nedeniyle avantajlıdır. Gama ışınlarına karşı çok güçlü bir radyasyon kalkanıdır. Kurşun yüksek kaynama noktasına sahiptir. Bu sayede reaktör daha etkili şekilde soğutulabilmektedir. Soğutucu akışkan çok yüksek sıcaklıklarda olmasına rağmen nükleer reaktör normal işletme koşullarında çalışmaktadır. Kurşun çok yüksek erime sıcaklığına ve yüksek buhar basıncına sahiptir. Bundan dolayı bu reaktörlerde tekrar yakıt yüklemesi ve bakım zordur (IRSN, 2018). Kurşun-bizmut ötektik, bazı nükleer reaktörlerde soğutucu olarak kullanılan % 44,5 kurşun ve % 55,5 bizmut içeren bir alaşımdır. Dördüncü nesil reaktörlerde de kullanılması düşünülen bir soğutucudur. Kurşun eriyince genişlerken, bizmut eridiğinde küçülür. Kurşun-bizmut ötektik alaşımı eridiğinde ise hacimsel değişim dikkate alınmayacak kadar azdır (Theus, 2010; Pioro, 2016).

Erimiş Tuz, nükleer reaktörlerde iki şekilde kullanılmaktadır. Birincisi nükleer yakıtın sabit olduğu, yani yakıt çubuklarında peletler halinde olan yakıtın soğutulması için kullanılırlar. İkincisinde ise yakıt sıvı şekildedir ve tuza eklenerek karışım oluşturulmuştur. Birinci şekilde kullanılan tuz FLiBe tuzu gibi hafif elementler içerir. İkinci şekildeki tuz ise Uranyum ve/veya Toryum eklenmesiyle reaktörde güç üretimini sağlayacak olan yakıt tuzudur (Forsberg, 2002; Pioro, 2016). FLiBe, lityum florür (LiF) ve berilyum florür (BeF₂) karışımından yapılan erimiş bir tuzdur. Nükleer reaktörde hem soğutucu hem de verimli veya bölünebilir malzeme için çözücüdür. Düşük atom ağırlığına sahip lityum, berilyum ve daha az miktarda florür, FLiBe'yi etkili bir nötron moderatörü yapar. Erimiş tuz reaktörlerinde ikinci ısı değiştiricide FLiNaK tuzu kullanılır. FLiNaK, en yaygın erimiş tuzlardan biridir; yüksek ısı kapasitesi, yüksek ısı iletkenliği, yüksek çalışma sıcaklığı ile hidrojen, nükleer yakıt ve diğer enerji alanlarında yaygın olarak kullanılmaktadır (Liu vd., 2016).

Nükleer reaktörlerde kullanılan bir başka soğutucu akışkan türü ise gazdır. Genel olarak Helyum ve CO₂'nin kullanıldığı reaktörlerde gaz türbini ve gazın basınçlandırılması için kompresör kullanılmaktadır. Ataletsizliği ve yüksek termal iletkenliği, nötron geçirgenliği ve reaktör koşulları altında radyoaktif izotoplar oluşturmadığı için helyum, gaz soğutmalı nükleer reaktörlerde ısı transfer aracı olarak kullanılmaktadır. Helyum inert bir gazdır, bu nedenle genel olarak herhangi bir malzemeye kimyasal olarak reaksiyona girmez. Buna ek olarak, helyumun nötron radyasyonuna maruz bırakılması, diğer soğutucu akışkanların aksine, helyumu radyoaktif hale getirmez. Reaktör soğutma gazı olarak maksimum helyum çıkış sıcaklığı yaklaşık 1300K'dir (Dudek vd., 2018). Helyumun özgül ısısı yüksektir, ancak yoğunluğu çok düşüktür. Sistemde yüksek basınç ve yüksek soğutma suyu debisi gerektirir. Helyumun düşük termal iletkenliği, yüksek soğutucu debisinde düşük ısı transferiyle sonuçlanır (Fanning, 2007). Helyum, brayton çevriminin ve türbin-jeneratör sisteminin bulunduğu yüksek sıcaklıklı gaz reaktörlerinde kullanılmaktadır (IRSN, 2012; IRSN, 2018).

CO₂, ısı kaynaklarında ve atık ısıda enerjiyi kullanmak için çalışan bir sıvı olarak birçok avantaja sahiptir. Çevreye zarar vermeyen doğal bir çalışma sıvısıdır ve kullanımı güvenlidir. Ayrıca, doğada bol miktarda bulunur ve düşük maliyetle temin edilebilir (Chen, 2011). CO₂ düşük kritik sıcaklığa ve yüksek kritik basınca sahiptir. Düşük kritik

sıcaklık sayesinde CO₂, düşük dereceli bir ısı kaynağında bile gayet verimli şekilde çalışır (Chen, 2011). Alev almayan, kararlı, inert, toksik olmayan, ucuz ve iyi karakterize edilmiş bir soğutucudur (Parma vd., 2015). CO₂, dördüncü nesil nükleer reaktörlerde de kullanılması planlanan bir akışkandır. CO₂, bu reaktörlerde süperkritik fazda olacak şekilde soğutmayı sağlayacaktır. Kritik noktaya yakın süperkritik özellikler, bir gazdan daha çok sıvıya benzeyen daha yüksek gaz yoğunlukları içerir ve kompresördeki pompalama gücünün tipik bir ideal Brayton döngüsüne kıyasla önemli ölçüde azaltılmasını sağlar. Pompalama gücündeki bu azalma, ısı verimin, aynı türbin giriş sıcaklığında ideal bir gaz Brayton çevrimi ile karşılaştırıldığında önemli ölçüde artırılmasını sağlar (Parma vd., 2015).

Organik olarak kontrol edilen ve soğutulan reaktörlerde hidrokarbon nükleer soğutucu olarak kullanılmıştır ancak başarılı olunamamıştır. Reaktörlerde kullanılan akışkanların erime, kaynama noktalarıyla kritik sıcaklık ve basınç değerleri aşağıdaki tabloda verilmiştir.

Tablo 1. Soğutucu akışkanların bazı özellikleri

Akışkan Türü	Erime Noktası	Kaynama Noktası	Kritik Sıcaklık	Kritik Basınç	Referans
Ağır Su	3,8°C	101,4°C			URL-2, (2019)
Su	0°C	100°C	374°C	22,064 MPa	URL-3, (2019)
CO ₂	-56,6°C	-78,5°C	31,1°C	7,38 MPa	Park vd., (2018)
Helyum	-272,2°C	-268,9°C			URL-4, (2019)
Kurşun	327,46°C	1749°C			Morita vd., (2006)
Kurşun-bizmut ötektik	123,5°C	1670°C			Morita vd., (2006)
Sodyum	97,72°C	883°C			Fanning, (2007)
FLiBe	731,15	1430			Davis, (2005)
FLiNaK	727,15	1570			Liu vd., (2017)

Bu akışkanların tamamı farklı tip reaktörlerin soğutulmasında kullanılmaktadır. Ancak soğutma çevrimlerinde güç üretiminin gerçekleştiği su ve gaz soğutmalı reaktörler haricinde diğer akışkanların kullanıldığı çevrimlerde, ikinci döngüde gaz veya buhar geçer. Gaz ile güç üretiminin olduğu çevrimlerde elektrik üretiminin sağlanması için türbin, gazın basınçlandırılması için kompresör, kompresöre girişte akışkanın sıcaklığını düşürmek için soğutucu ve jeneratör kullanılır. Buhar ile güç üretiminin olduğu çevrimlerde ise buhar türbini elektrik üretiminde görev alır. Çevrimde akışkanın dolaşması için basınçlandırma görevi pompa ile görülür. Pompaya soğutucu akışkan tamamen sıvı olarak gelmelidir. Bundan dolayı pompa öncesinde, türbin çıkışındaki buharı sıvı hale getirmek için soğutucu kullanılır. Pompa ile basınçlandırılan akışkan tekrar reaktör bölgesine veya ikincil ısı değiştiriciye giderek çevrimi tamamlar.

1.3.6. Dördüncü Nesil Reaktörler

Dördüncü nesil nükleer reaktörler çalışma prensiplerine veya kullanılan soğutucu türlerine göre başlıca altı ana başlık altında toplanmıştır. Bu reaktörler şu şekildedir (URL-5); i) Gaz soğutmalı hızlı reaktör, ii) Kurşun soğutmalı hızlı reaktör, iii) Erimiş tuz reaktörü, iv) Sodyum soğutmalı hızlı reaktör, v) Çok yüksek sıcaklıklı reaktör, ve vi) Süperkritik su soğutmalı nükleer reaktör.

Yeni nesil küçük modüler nükleer reaktörlerden olan erimiş tuz reaktörlerine (MSR) ilgi son yıllarda özellikle Japonya, Rusya, Çin, Fransa ve ABD’de artmıştır. Erimiş tuz reaktörlerinde iki tür konsept bulunmaktadır. Bunlardan biri erimiş tuzlu hızlı reaktör (MSFR), diğeri ileri yüksek sıcaklık reaktörleri (AHTR)’dir. Tuz reaktörleri besleyiciden ziyade yakıcı reaktörlerdir. MSR’ leri için tuz üretimi odaklanılması gereken konuların başında gelmektedir (Ho vd., 2013).

Dördüncü nesil reaktörlerin çoğu hızlı reaktörler olarak da adlandırılan hızlı nötron reaktörleridir. Hızlı reaktörler, normal reaktörlerin kullanılmış yakıtlarından geri kazanılan uzun ömürlü aktinidleri de yakabilir ve kapalı döngü yakıt sistemi olarak çalışır. Hızlı reaktörler verimli, güvenli ve sürdürülebilir enerji sağlar (URL-8). Hızlı nötron reaktörleri, var olan termal reaktörlere kıyasla uranyumdan 60 kat daha fazla enerji

alma potansiyeline sahiptir ve radyoaktif atık yükünde önemli bir azalmaya katkıda bulunur (URL-9). Hızlı reaktörlerde fisyon nötronları yavaşlamaz bunun yerine yüksek enerjili fisil çekirdeklerle çarpışarak fisyonlara neden olur. Yüksek enerjili nötronların neden olduğu fisyonlar, termal nötronların neden olduğu fisyonlardan daha fazla fisyon salınımı yaparak daha verimli şekilde elektrik üretimini sağlar (URL-10).

Gaz soğutmalı hızlı reaktör hızlı nötron spektrumu, helyum soğutmalı bir reaktör ve kapalı bir yakıt döngüsüne sahiptir. Helyum soğutucusunun yüksek çıkış sıcaklığı, elektrik, hidrojen veya proses ısısını yüksek verimle sağlamayı mümkün kılar. Doğrudan bir Brayton çevrimine sahip olan sistemde gaz türbininden yüksek termal verim elde edilir (Theus, 2010; Dudek vd., 2018). Gaz soğutmalı hızlı reaktörün en büyük dezavantajı, soğutucusunun düşük termal ataletine kıyasla çekirdeğin nispeten yüksek güç yoğunluğudur. Bu problemin üstesinden gelmek amacıyla 1600 °C' nin üzerindeki sıcaklıklara dayanabilen bir refrakter yakıt geliştirmek için araştırmalar devam etmektedir, ancak bu tip bir yakıtın uygulanabilirliği gerçeklikten uzaktır (Pioro, 2016; IRSN,2012; IRSN, 2018). Gaz soğutmalı hızlı reaktör diğer beş konsepte göre ciddi kazaların etkisini azaltmada daha az etkili görünmektedir, çünkü kullandığı soğutucu akışkan radyoaktif maddeleri tutamamaktadır (IRSN, 2018).

Kurşun soğutmalı hızlı reaktör, kurşun veya kurşun-bizmut ötektik sıvı-metal soğutmalı reaktördür. Fertil uranyumun verimli dönüşümü ve aktinitlerin yönetimi için kapalı bir yakıt çevrimine sahiptir (Pioro, 2016; Theus, 2010). Kurşun soğutmalı hızlı reaktörün önemli bir özelliği de, erimiş kurşun kullanılmasından dolayı daha üst düzey bir güvenliğe sahip olmasıdır. Sürdürülebilirlik açısından, kurşun bol ve kolayca elde edilebilir. Daha da önemlisi, yakıt sürdürülebilirliği, LFR yakıt döngüsünün dönüşüm yetenekleri ile büyük ölçüde artmaktadır. LFR, öncelikle elektrik üretimi, hidrojen üretimi ve aktinit yönetimi için tasarlanmıştır (Carelli ve Ingersoll, 2014; Theus, 2010). Kurşun soğutmalı (veya LBE soğutmalı) reaktörlerin ana dezavantajı, soğutucusunun paslanmaz çelik yapıları paslanma ve aşındırma eğiliminde olmasıdır. Bu sorunun üstesinden gelinmesi gereken süreç, bu yapıların yüzeyinde bir demir oksit tabakası oluşturmayı içerir. Bununla birlikte, bu işlemin üstesinden gelmek, çalışma sıcaklığı ve reaktör soğutma sıvısı arıtması açısından önemli kısıtlamalar nedeniyle karmaşık görünmektedir. Reaktörün çalışma sıcaklığı aralığı ayrıca kurşun donma riskini ortaya

çıkartır (IRSN, 2012; IRSN, 2018). Reaktör bölgesini soğutan kurşunun soğutulması için ikinci döngüde gaz kullanılmaktadır. Elektrik üretimi de ikinci döngüde kurşundan aldığı enerji ile ısınan gazdan sağlanır.

Erimiş tuz reaktörü, tasarlanan altı farklı dördüncü nesil nükleer reaktörden biridir. Yapılması düşünülen diğer sistemlerden oldukça farklıdır. Ana farklar, soğutucu ve yakıtın bazı modellerde karıştırılması ve sıvı yakıtın kullanılmasıdır (IRSN, 2018). Yani FLiBe gibi içinde küçük elementler bulunduran tuzlara Uranyum ve/veya Toryum eklenmesiyle oluşan yakıt kullanılır. Bununla birlikte, tuzun çok düşük termal ataleti ve sistemin çok yüksek çalışma sıcaklıkları, yakıt tuzu drenaj cihazlarının kullanılmasını gerektirir. Sistem güvenliği temel olarak bu cihazların güvenilirliğine ve performansına bağlıdır (IRSN, 2018). Ayrıca termal iletkenlikleri yüksek olan ve katı yakıtla çalışan reaktörlerde bulunan FLiBe ve FLiNaK gibi erimiş tuzlarda bu reaktörlerde kullanılmaktadır. Erimiş tuz reaktörlerinde sıcaklık tasarım sınırlarının ötesine yükselirse yakıt tuzu genişler ve bunun sonucunda reaktör kendini kapatır. Bir tehlike olmasını engeller. Ayrıca meydana gelebilecek bir olumsuzlukta reaktördeki güç seviyesi kontrol çubukları vasıtasıyla da ayarlanır MSR, atmosferik basınçta çalışır ve uçucu radyoaktif maddelerin patlayıcı salınım riskini ortadan kaldırır (LeBlanc, 2010).

Erimiş tuz reaktörlerinin temel yararları, erimiş tuzun mükemmel ısı taşıma özelliklerinden yararlanırken, yakıcı ve besleyici reaktör konseptini bünyesinde barındıran entegre bir yakıt döngüsü sunmasıdır. Bu özellikler, termal güç çıkışının daha yüksek olacağını gösterir ve MSR tipi reaktörün diğer reaktörlerden daha küçük olabileceğini gösterir. Sistemdeki zorluk ise erimiş tuz kimyasının ve kullanımının korozyonu artırıcı etkisi vardır. Bu etkiden dolayı malzemelerin korozyona karşı direncinin geliştirilmesi gerekmektedir. Yeni üretilecek reaktör elemanlarıyla birlikte yakıt döngüsünün de iyileştirilmesi gerekmektedir (Theus, 2010; Carelli ve Ingersoll, 2014; Ingersoll, 2015).

LiF kimyasal olarak kararlıdır. FLiBe tuzu ötektiktir. FLiBe tuzu 459 °C'lik bir erime noktasına sahipken 1430 °C'de kaynar. FLiBe erimiş tuzu, MSR ve AHTR primer soğutmasında tercih edilir. Düşük korozyon etkisine sahip olması da kapalı döngü yakıt çevrimi için büyük bir avantajdır (Ho vd., 2013).

Sodyum soğutmalı hızlı reaktör, atmosfer basıncında, soğutucu akışkan olarak sıvı sodyum ile çalışmaktadır (Fanning, 2007). Reaktör bölgesinde soğutulan sodyumun ısısı bir ısı değiştirici yardımıyla suya aktarılır. Su ısınarak buhar formuna döner ve enerji üretimi için buhar türbinine gider. Türbinde enerji kaybeden buhar bir soğutucu vasıtasıyla tekrar sıvı hale gelir. Sıvı hale gelen akışkan pompa yardımıyla tekrar ısı değiştiriciye gönderilir. Bu şekilde sodyum soğutmalı hızlı reaktörün çevrimi tamamlanmış olur (URL-6).

Çok yüksek sıcaklıklı reaktör; grafit moderatörlü, helyum soğutmalı, termal nötron spektrumlu ve uranyum yakıt döngüsüne sahip bir reaktördür (Ingersoll, 2015). Yüksek sıcaklıkta çalışan ve elektrik üretimi ile gerekli proses ısını sağlayabilen yüksek verimli bir sistem olarak tasarlanmıştır. Referans reaktörü, proses ısını sağlamak için bir ara ısı değiştiricisine bağlı 600 MW_{th} gücünde bir reaktördür. Reaktör koru prizmatik bir bloktur (Theus, 2010). Çok yüksek sıcaklıklı reaktör, 900 °C'nin üzerindeki ortalama soğutma suyu çıkış sıcaklığı ve 1250 °C'nin üzerindeki yakıt sıcaklığı ile tasarlanmıştır (Dudek vd., 2018). Çok yüksek sıcaklıklarda çalışıldığından bu reaktörlerden hidrojen üretimi gerçekleştirilebilir.

Süperkritik su soğutmalı nükleer reaktörler, günümüzdeki hafif su reaktörlerine dayalı olarak tasarlanan bir sistem olup suyun kritik basınç ve sıcaklık noktasında (374°C, 325 MPa) çalışan yüksek sıcaklıklı, yüksek basınçlı, su soğutmalı bir reaktördür. Süperkritik su soğutmalı reaktör mevcut hafif-su reaktörlerinin yaklaşık üç katı daha yüksek bir termal verimlilik sağlar (IRSN, 2018). Reaktördeki soğutma sıvısı reaktördeki fazı değiştirmez ve doğrudan enerji dönüştürme ekipmanına yani buhar türbinine bağlanır. Bu reaktörlerin yapılması için alınan referans reaktör sistemi, 25 MPa işletme basıncına ve 510°C'lik bir reaktör çıkış sıcaklığına sahip, 1700 MW_e gücünde bir nükleer reaktördür. Sistemde kullanılan yakıt uranyum oksittir (Theus, 2010). Süperkritik su soğutmalı reaktörler, verimli ve ekonomik nükleer reaktörlerdir (IRSN, 2018).

1.4. Enerji ve Ekserji Analizinin Gereksinimi

Termodinamiğin birinci kanunu kapsamında yapılan enerji analizi ile sistem ya da proseslerin potansiyel iyileştirilmeleri sağlanır. Termodinamiğin İkinci Kanunu kapsamında yapılan ekserji analizi ile sistem ya da proseslerde meydana gelen tersinmezliklerin türünün, yerinin, boyutunun, niteliğinin ve miktarının belirlenmesi ve azaltılması konusunda ne yapılacağı ve böylece verimin nasıl iyileştirileceği hakkında çözüm önerileri ortaya konulur.

1.5. Literatür Özeti

Modüler nükleer reaktörler ve soğutucu akışkan çevrimleri hakkında detaylı bir literatür araştırması yapılarak enerji ve ekserji analizleri üzerine yapılan çalışmalar aşağıda özetlenmiştir.

Ancak bu tez çalışmasının temel amacını oluşturan “LiF-BeF₂ birincil soğutucu akışkanı ile soğutulan bir modüler nükleer reaktörün süperkritik karbondioksit, süperkritik su ve LiF-NaF-KF gibi ikincil soğutucu akışkanlarla farklı modlarda soğutulmasının ve güç üretiminin termodinamik performansının araştırılması” konusunda tez teslimi itibarıyla konuyu bir tez amacı doğrultusunda bir bütün olarak yansıtan bir çalışmaya rastlanmamıştır.

Granovskii vd. (2007), s-Su reaktöründe kimyasal ısı pompası kullanmışlardır. Sistemin hem genel hem de her bir parçası için ayrı ayrı ekserji analizini gerçekleştirmişler ve ısı pompası kullanımıyla ortaya çıkan sonuçların değerlendirmesini yapmışlardır.

Ünsal (2010), Yüksek lisans tezi olarak CANDU 6 reaktörünün ekserji analizini gerçekleştirmiştir. Sistemdeki her bir parça için tek tek enerji ve ekserji değerlerini hesaplayarak sonuçları ortaya koymuştur.

Chen (2011), yaptığı tez çalışması kapsamında CO₂ akışkanı ile güç üretimini incelemiştir. Güç çevrimlerinin termodinamik incelemesi kapsamında enerji ve ekserji analizlerini gerçekleştirmiş ve sonuçları ortaya koymuştur.

Mohammadkhani vd. (2014), iki tane organik rankine çevriminin kombine edildiği 299 MW elektrik üreten gaz türbinli modüler helyum reaktörünün parametrik olarak incelemesini gerçekleştirerek eksergoekonomik analizini yapmışlardır. Ekserji yıkımının maliyet oranını ortaya koymuşlardır.

Luo vd. (2014), 200 MW termal kapasiteye sahip yüksek sıcaklıklı bir gaz reaktörünün soğutma amaçlı kullanılması hakkında çalışmışlardır. Amonyak ve su kullanılan kojenerasyon bir soğutma sisteminin enerji ve ekserji analizini gerçekleştirmişlerdir.

Boldon vd. (2015), hibrid bir enerji sisteminin olduğu küçük modüler reaktörün ekserji analizini gerçekleştirmişlerdir. Sistemde hidrojen ve elektrik üretimi yapmışlardır. Elektrik üretimi aşamasında bir de rüzgâr enerjisi ile elektrik elde edilerek tüm sisteme ait ekserji analizlerini sunmuşlardır.

Pham vd. (2015), sodyum soğutmalı bir reaktörün s-CO₂ döngüsü ile etkileşiminin ekserji analizini gerçekleştirmişlerdir. Parametrik bir çalışma ile reaktörün iyileştirilmesi için öneride bulunmuşlardır.

Paredes vd. (2015), hidrojen üretiminin gerçekleştirildiği bir termokimyasal nükleer reaktörün ekserji ve enerji analizlerini yapmışlardır. Sistemde giren ve çıkan tüm ısı transfer mekanizmalarını da dikkate alarak hesaplamalar yapmışlar ve verimi hesaplamışlardır.

Edwards vd. (2016), hafif su reaktörleri ve gelişmiş reaktörler için enerji ve ekserji analizlerini gerçekleştirmişlerdir. Çalışmalarında, termal enerji depolama ve soğutucu akışkan olan tuz hakkında araştırmalar yapmışlardır.

Terzi vd. (2016), su moderatörlü su soğutmalı bir nükleer reaktörün ekserji analizini yaparak sistemdeki elemanların tersinmezlik açısından incelemesini gerçekleştirmişlerdir.

Wang ve Dai (2016), gaz türbinli modüler helyum reaktöründen atık ısı kazanımının eksergoekonomik araştırmasını yapmışlardır. Sistemde gazın soğutulması için ısı değiştiricilerde soğutucu akışkan olarak CO₂ kullanılmıştır. CO₂ kullanılmasıyla birlikte daha az ekserji yıkımının olduğu gözlemlenmiştir.

Khalid vd. (2016), bir CANDU 6 reaktörü ile sodyum soğutmalı hızlı reaktörünün nükleer desalinasyonları hakkında çalışmışlardır. Yeni nesil olmasından dolayı karşılaştırılacak reaktör olarak sodyum soğutmalı hızlı reaktörü seçmişlerdir. Sistemin elektrik gücü üretimi ve desalinasyon işlemi üzerine ekserji analizini gerçekleştirmişlerdir.

Boldon vd. (2016), hibrid bir enerji sisteminin olduğu küçük modüler reaktörün termodinamik analizini gerçekleştirmişlerdir. Elektrik üretimi aşamasında bir de rüzgâr enerjisi ile elektrik elde edilerek tüm sisteme ait ekserji analizlerini yapmışlar ve çevrimdeki kayıplara bağlı olarak eksergoekonomik analizleri sunmuşlardır.

Al-Zareer vd. (2017), nükleer bazlı bir elektrik ve hidrojen üretimi yapılan tesise hidrojen üretimi için dört basamaklı bakır-klor çevrimi eklemişlerdir. Reaktörün termal gücüyle s-Su soğutmalı reaktörün akışkanını ısıtıp elektrik üretimi ve hidrojen üretimini gerçekleştirmişlerdir. Bu sistemin enerji ve ekserji analizini gerçekleştirmişlerdir.

Wang vd. (2017), kurşun-bizmut ötektik soğutmalı bir nükleer reaktörün ekserji analizini gerçekleştirmişlerdir. Reaktör bölgesinde kurşun-bizmut ötektik soğutucusu bulunurken ısı değiştiricide helyum gazı akmaktadır. Sistemin ekserji analizini yaparak sistemin geliştirilmesine katkıda bulunmuşlardır.

Liu vd. (2017), akışkan olarak kullanılan yüksek sıcaklıkta çalışan ve sıcaklığı bilinen FLiNaK erimiş tuzu ile bir termoklin termal enerji depolama sisteminin termal performans analizini gerçekleştirip sonuçları ortaya koymuşlardır.

Priego vd. (2017), SMART diye adlandırılan nükleer reaktörden desalinasyon işlemi için buhar çıkışı üzerine çalışmışlardır. Sistemin her bir elemanı için ekserji hesabını gerçekleştirmişler ve devamında termoekonomik analiz yapmışlardır.

Kong vd. (2017), kurşun soğutmalı bir nükleer reaktöre entegre edilmiş s-CO₂ brayton döngüsünün termodinamik analizini gerçekleştirmişlerdir. Türbine gidecek olan ve sistemde dolaşacak olan akışkanın tekrar ısıtılması için var olana bir de alternatif yol ekleyerek tasarım yapmışlar ve ekserji analizi gerçekleştirmişlerdir.

Park vd. (2018), güç üretimi sistemi olarak brayton çevrimi kullanılan ve ikincil soğutucu akışkan olarak da azot kullanılan sodyum soğutmalı hızlı reaktörün optimizasyon ve duyarlılık analizini gerçekleştirmişlerdir. Sistemin enerji analizini yapmışlardır.

Dudek vd. (2018), helyum ile soğutulan yüksek sıcaklıklı gaz reaktörünün enerji üretim döngüsünün termodinamik analizini yapmışlardır. Sistemin tamamı için enerji ve ekserji analizleri gerçekleştirilmiştir.

Kim vd. (2018), Nükleer-Yenilenebilir hibrid enerji sistemine entegre yüksek sıcaklıkta buhar elektrolizi tesisinin dinamik performans analizini gerçekleştirmiştir. Maliyete etkisini sunmuştur.

Li vd. (2018), s-CO₂'i farklı güç üretim sistemlerinde kullanmışlardır. Her bir sistemin enerji ve ekserji analizlerini gerçekleştirmişlerdir ve ekserji yıkımlarını göstermişlerdir.

Schröders ve Allelein (2018), güneş kulesi ve yüksek sıcaklıklı nükleer reaktörde amonyak üretiminin enerji ve ekonomik analizlerini gerçekleştirmiştir.

Park vd. (2018), üç tip 300 MW'lık SMR için s-CO₂ Brayton döngüsünün optimizasyonunu ve termodinamik analizini yapmıştır. Farklı türbin giriş sıcaklıklarına göre analizler yapılmış ve verim hesaplaması yapılarak karşılaştırmalar yapılmıştır.

Seyyedi vd. (2018), basınçlı su reaktörüne gaz türbini entegre edilmiş bir sistemin ekserji ve eksergoekonomik analizini gerçekleştirmişlerdir. Toplam maliyet hesabı ve türbinden elde edilen güce göre maliyet hesaplamalarını yapmışlardır.

Ferroni ve Natale (2018), basınçlı su reaktörünün buhar besleme sistemi üzerine çalışmışlardır. Tüm soğutucu sistem ve buhar besleme sisteminin enerji ve ekserji analizini gerçekleştirmişlerdir.

Mohammadi vd. (2019), s-CO₂ çevrimi olan bir NPP'nin ekserji analizini yapmışlardır. s-CO₂ çevriminin gerçek potansiyelini belirlemek için ekserji yıkımını hesaplamışlardır. Sistemin genel ekserji verimini bulmuşlardır.

Wilson vd. (2019), Hafif su soğutmalı reaktörlerde ve nükleer reaktörlerde enerji depolama seçeneği için çözüm sunmaya çalışmışlar ve optimizasyon çalışmaları gerçekleştirmişlerdir. Üretilen buharın ne şekilde kullanılarak enerji depolanacağı hakkında çalışmışlardır.

Omar vd. (2019), s-CO₂ temelli güç çevrimlerinin, yenilenebilir enerji sistemleri, içten yanmalı motor, yakıt pilleri gibi farklı sistemlerle kıyaslamasını yapmıştır. Termodinamik açıdan her bir sistemi inceleyip sonuçları ortaya koymuşlardır.

ABD'de Flibe Enerji, 1960'larda erimiş tuz reaktör programına dayanan 40 MW'lık iki akışkanlı bir termal reaktör konseptini ele almıştır. Her iki devrede birincil soğutucu akışkan olarak FLiBe tuzu kullanır. Yakıt olarak Toryum kullanılır. 2 MW termal gücünde bir pilot tesis ve sonrasında 2225 MW termal gücünde ticari tesis yapılması öngörülmüştür (URL-11).

Kanada merkezli Terrestrial Enerji şirketi, Integral MSR'yi tasarladı. IMSR, birçok endüstriyel proses ısısı uygulamasını destekleyebilecek olan 600-700 °C'de çalışacaktır (URL-12). IMSR'ler 80, 300 ve 600 MW olmak üzere üç farklı termal güçte olacak şekilde tasarlanmıştır. 600 MW'lık reaktörün maliyeti, doğalgaz ile aynı seviyededir. 80 MW termal gücünde olan reaktör ise şebeke dışı kullanım için ve uzak güç uygulamaları için tasarlanmıştır. IMSR'lerin 2030'da devreye girmesi beklenmektedir (URL-11).

ABD'deki Oak Ridge Ulusal Laboratuvarı'nda, AHTR ile erimiş tuz soğutucu akışkan araştırmaları yeniden gündeme gelmiştir. AHTR, gazla soğutulan HTR'ye benzer şekilde, düşük basınçta, daha yüksek sıcaklıkta çalışır ve helyum vasıtasıyla daha iyi ısı transferi sağlar. FLiBe tuzu yalnızca soğutucu olarak kullanılır ve düşük basınçta 750-1000 °C veya daha yüksek sıcaklıklara ulaşır. Bu reaktörler termokimyasal hidrojen üretiminde de kullanılabilir (Forsberg, 2004).

Tablo 2. Literatürdeki çalışmaların özeti

Çalışma konusu	Referans	Çalışmanın amacı
s-CO ₂ Kullanılan Sistemler	Chen, (2011),	CO ₂ akışkanı ile güç üretimini incelemiştir. Güç çevrimlerinin termodinamik incelemesini gerçekleştirmiştir.
	Pham vd., (2015),	Sodyum soğutmalı bir reaktörün s-CO ₂ döngüsü ile etkileşiminin ekserji analizini gerçekleştirmişlerdir.
	Kong vd., (2017),	Kurşun soğutmalı bir nükleer reaktöre entegre edilmiş s-CO ₂ brayton döngüsünün termodinamik analizini gerçekleştirmişlerdir.
	Li vd., (2018),	s-CO ₂ 'i farklı güç üretim sistemlerinde kullanmışlardır. Her bir sistemin enerji ve ekserji analizlerini gerçekleştirmişlerdir.
	Park vd., (2018),	s-CO ₂ Brayton döngüsünün optimizasyonunu ve termodinamik analizini yapmıştır.
	Mohammadi vd., (2019),	s-CO ₂ çevrimi olan bir nükleer güç sisteminin ekserji analizini yapmışlardır.
Eksergoekonomik ve Maliyet Analizi	Omar vd., (2019),	s-CO ₂ temelli güç çevrimlerinin farklı sistemlerle kıyaslamasını yapmıştır.
	Priego vd., (2017),	SMART diye adlandırılan nükleer reaktörün her bir elemanı için ekserji hesabını gerçekleştirmişler.
	Seyyedi vd., (2018),	Basınçlı su reaktörüne gaz türbini entegre edilmiş bir sistemin ekserji ve eksergoekonomik analizini gerçekleştirmişlerdir.
	Kim vd., (2018),	Nükleer-Yenilenebilir hibrid enerji sisteminin dinamik performans analizini gerçekleştirmişlerdir. Maliyete etkisini sunmuşlardır.

Tablo 2 (devam). Literatürdeki çalışmaların özeti

Çalışma konusu	Referans	Çalışmanın amacı
Enerji ve Ekserji Analizi	Granovskii vd., (2007),	Kimyasal ısı pompası kullanılan s-Su reaktörünün enerji ve ekserji analizini gerçekleştirmiştir.
	Ünsal, (2010),	CANDU 6 reaktörünün ekserji analizini gerçekleştirmiştir.
	Luo vd., (2014),	Yüksek sıcaklıklı bir gaz reaktörünün amonyak ve su kullanılarak soğutulmasının enerji ve ekserji analizini gerçekleştirmişlerdir.
	Boldon vd., (2015),	Hibrid bir enerji sisteminin olduğu küçük modüler reaktörün ekserji analizini gerçekleştirmişlerdir
	Terzi vd., (2016),	Su moderatörlü su soğutmalı bir nükleer reaktörün ekserji analizini gerçekleştirmişlerdir.
	Edwards vd., (2016),	Hafif su reaktörleri ve gelişmiş reaktörler için enerji ve ekserji analizlerini gerçekleştirmişlerdir.
	Khalid vd., (2016),	CANDU 6 reaktörü ile sodyum soğutmalı hızlı reaktörünün nükleer desalinasyon işlemi üzerine ekserji analizi gerçekleştirmişlerdir
	Al-Zareer vd., (2017),	Nükleer bazlı bir elektrik ve hidrojen üretimi yapılan tesise hidrojen üretimi için dört basamaklı bakır-klor çevrimi eklemişler ve ekserji analizini yapmışlardır.
	Wang vd., (2017),	Kurşun-bizmut ötektik soğutmalı bir nükleer reaktörün ekserji analizini gerçekleştirmişlerdir.
	Liu vd., (2017),	FLiNaK erimiş tuzu ile bir termoklin termal enerji depolama sisteminin termal performans analizini gerçekleştirip sonuçları ortaya koymuşlardır.

Tablo 2 (devam). Literatürdeki çalışmaların özeti

Çalışma konusu	Referans	Çalışmanın amacı
Enerji ve Ekserji Analizi	Ferroni ve Natale., (2018),	Basınçlı su reaktörünün buhar besleme sistemi hakkında çalışmışlardır. Tüm soğutucu sistem ve buhar besleme sisteminin enerji ve ekserji analizini gerçekleştirmişlerdir.
	Dudek vd., (2018),	Helyum ile soğutulan yüksek sıcaklıklı gaz reaktörünün enerji üretim döngüsünün termodinamik analizini yapmışlardır. Sistemin tamamı için enerji ve ekserji analizleri gerçekleştirilmiştir.
	Park vd., (2018),	Sodyum soğutmalı hızlı reaktörün optimizasyon ve duyarlılık analizini gerçekleştirmişlerdir. Sistemin enerji analizini yapmışlardır.
	Schröders ve Allelein, (2018),	Güneş kulesi ve yüksek sıcaklıklı nükleer reaktörde amonyak üretiminin enerji ve ekonomik analizlerini gerçekleştirmiştir.
Eksergoekonomik ve Maliyet Analizi	Wilson vd., (2019),	Hafif su soğutmalı reaktörlerde ve nükleer reaktörlerde enerji depolama seçeneği için çözüm sunmaya çalışmışlar ve optimizasyon çalışmaları gerçekleştirmişlerdir.
	Mohammadkhani vd., (2014),	Gaz türbinli modüler helyum reaktörünün parametrik olarak incelemesini gerçekleştirerek eksergoekonomik analizini yapmışlardır.
	Boldon vd., (2015),	Hibrid bir enerji sisteminin olduğu küçük modüler reaktörün ekserji analizini gerçekleştirmişlerdir
	Wang ve Dai, (2016),	Gaz türbinli modüler reaktöründen eksergoekonomik araştırmasını yapmışlardır.

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

Bu tez çalışmasında, termodinamik açıdan incelenen ve reaktör kabında FLiBe tuzunun dolaştığı, ikincil soğutucu akışkan olarak sırasıyla s-CO₂, s-Su ve FLiNaK kullanılan küçük ölçekli tuz soğutmalı modüler nükleer reaktörün üç farklı modda soğutma ve güç üretimi aşamasındaki enerji ve ekserji analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda yapılan çalışmalar, teorik çalışmalar ve termodinamik çalışmalar olacak şekilde aşağıda sunulmuştur.

Bu çalışmanın literatürdeki çalışmalardan farkı, FLiBe birincil soğutucu akışkanı ile soğutulan küçük ölçekli bir modüler nükleer reaktöre entegre bir ısı değiştirici/ısı değiştiricileri vasıtasıyla s-CO₂, s-Su ve FLiNaK gibi ikincil soğutucu akışkanlarla soğutulmasının ve üç farklı çevrimde elektrik üretiminin gerçekleştirilmesi ve bu konseptin enerji ve ekserji analizinin yapılmasıdır.

2.1. Teorik Çalışmalar

Bu tez çalışmasının teorik çalışmalar kısmında; çalışmayla ilgili genel kabuller, tasarlanan çevrimlerde etkili büyüklükler, sistemlerin çalışma prensibi ile sistemlerin güç üretimi akış şeması detaylı olarak sunulmuştur.

2.1.1. Genel Kabuller

Bu tez çalışması kapsamında, dikkate alınan kabuller aşağıda maddeler halinde sunulmuştur.

Şanghay Nükleer Uygulamalı Fizik Enstitüsü'nde 5 MW termal gücündeki prototip nükleer reaktör yapım aşamasında olduğu bilinmektedir.

- Oak Ridge Ulusal Laboratuvarı'nda testleri yapılan 8 MW'lık nükleer reaktörün ısı kapasitesi, bu çalışma için referans yaklaşık ısı kapasite olarak alınmıştır (Haubenreich ve Engel, 1970; URL-1).

- Tasarlanan modlarda, birincil soğutucu akışkan akış yönlendirici ısıl darbe soğurma bariyeri kullanılmıştır. Bu bariyerin içten soğutmalı olması durumunda soğutma yükleri de dikkate alınmalıdır. Bu çalışmada içten soğutmalı bariyer yerine dolu bariyer kullanıldığından bu durum dikkate alınmamıştır.
- FLiBe %99,995 saflıkta %14 oranında 7Li içerir. Çoğu durumlarda yakıt bu tuzun içinde çözülür, radyasyondan etkilenmez, hava ve su ile tepkimeye girmez ve reaktör içerisindeki metallere karşı inert davranış gösterir. Bu nedenle bu çalışmada temel soğutucu akışkan olarak FLiBe tercih edilmiştir (URL-7).
- Reaktör bölgesinin kor kısmında bulunan yakıt çubuklarından çok yüksek seviyede bir ısı ortaya çıkar. Soğutucu akışkanın tamamıyla bu fisyon enerjisini aldığı kabul edilmiştir.
- Sistem sürekli akışlı sürekli açık halde kararlı olduğu düşünülmüştür.
- Tasarlanan modlarda gaz türbini politropik verimi %85 (Boldon vd., 2015), buhar türbini izantropik verimi %87 (Compton ve Rezaie, 2018), kompresör Politropik verimi %90 (Özsaban, 2009), pompa izantropik verimi %84 (Kutbi, 1991), reküperatörlerin ve eşanjörlerin etkinliği %95 (Zada vd., 2018) olarak kabul edilmiştir.
- Tasarlanan soğutma modlarındaki elemanlarda ve elemanların ara bağlantılarında meydana gelen basınç ve ısı kayıpları ihmal edilmiştir (Ünsal, 2010; Terzi, 2016).
- Kinetik ve potansiyel enerji ve ekserji değerleri ihmal edilmiştir.
- Reaktör kabında ısıl darbe yönlendirme bariyeri kullanılmıştır.
- Özgül ısı oranı $k=1,615$ ve politropik üs değeri $n=1,306$ olarak alınmıştır (Mcnamara ve Anderson, 2014).
- Reaktör kabındaki tuzun sirkülasyonunu sağlayan pompanın gücü düşük olduğundan hesaplarda ihmal edilmiştir.

- Reaktörde üretilen ısınnın %50'lik kısmının s-Su soğutma modunu diğer %50'lik kısmınında s-CO₂/FLiNaK soğutma modunu beslediği kabul edilmiştir.
- Entalpi ve entropi değerleri Temmuz/2019'da NIST'ten alınmış olup NIST'teki değişikliklere bağlı olarak değişebilir.

2.1.2 Sistemde Etkili Büyüklükler

Soğutma ve güç üretimi için gerekli enerji ve ekserji kıyaslamalarının yapılması amacıyla tasarlanan üç farklı soğutma modundan güç üretiminin enerji ve ekserji analizleri sırasında ele alınan sistemdeki etkili büyüklükler üç başlık altında toplanmıştır.

2.1.2.1. Sabit Büyüklükler

Tez çalışmasının amaçları kapsamında, ele alınan sistemin enerji ve ekserji analizleri yapılması için gereken sabit büyüklükler literatürde sunulmuş olan kaynaklardan alınmış ve Tablo 3' te gösterilmiştir.

Tablo 3. Sabit büyüklükler

Sabit Büyüklük	Birim	Değer	Referans
Evrensel gaz sabiti	kPa.m ³ /kmol.K	8,314	Çengel ve Boles, (2015)
Benedict Webb Rubin sabiti (a)	-	13,86	Wark, (1983)
Benedict Webb Rubin sabiti (A ₀)	-	277,30	Wark, (1983)
Benedict Webb Rubin sabiti (b)	-	0,007210	Wark, (1983)
Benedict Webb Rubin sabiti (B ₀)	-	0,04991	Wark, (1983)
Benedict Webb Rubin sabiti (c)	-	1,511 x 10 ⁶	Wark, (1983)
Benedict Webb Rubin sabiti (C ₀)	-	1,404 x 10 ⁷	Wark, (1983)
Benedict Webb Rubin sabiti (a)	-	8,470 x 10 ⁻⁵	Wark, (1983)
Benedict Webb Rubin sabiti (γ)	-	0,00539	Wark, (1983)
FLiBe sabiti (A _{m,l})	-	- 0,4884	Liu vd., (2016)
FLiBe sabiti (B _{m,l})	-	2279,7	Liu vd., (2016)

Tablo 3 (devam). Sabit büyüklükler

Sabit Büyüklük	Birim	Değer	Referans
FLiBe sabiti ($C_{m,i}$)	-	$2,3 \times 10^{-11}$	Liu vd., (2016)
FLiBe sabiti ($D_{m,i}$)	-	0,001	Liu vd., (2016)
FLiNaK sabiti ($A_{m,i}$)	-	- 0,73	Liu vd., (2017)
FLiNaK sabiti ($B_{m,i}$)	-	2530	Liu vd., (2017)
FLiNaK sabiti ($C_{m,i}$)	-	$2,3 \times 10^{-11}$	Liu vd., (2017)
FLiNaK sabiti ($D_{m,i}$)	-	0,001	Liu vd., (2017)

2.1.2.2. Hesaplanabilen büyüklükler

Tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen çalışmalarda kullanılan, hesaplanabilen büyüklükler Tablo 4'te verilmiştir.

Tablo 4. Hesaplanabilen Büyüklükler

Sabit Büyüklük	Birim
Sıkıştırılabilirlik	-
FLiBe Entalpisi	kJ/kg
FLiBe Entropisi	kJ/kgK
FLiNaK Entalpisi	kJ/kg
FLiNaK Entropisi	kJ/kgK
FLiNaK Tuz Debisi	kg/s
s-CO ₂ Debisi	kg/s
s-Su Debisi	kg/s
Birinci Türbinin Enerjisi	kW
İkinci Türbinin Enerjisi	kW
Birinci Kompresörün Enerjisi	kW
İkinci Kompresörün Enerjisi	kW
Pompanın gücü	kW
Soğutma yükü	kW
Elektriksel Verim	-
Sistem Verimi	-
Birinci Türbinin Ekserji Kaybı	kW
İkinci Türbinin Ekserji Kaybı	kW
Birinci Kompresörün Ekserji Kaybı	kW
İkinci Kompresörün Ekserji Kaybı	kW
Reaktörün Ekserji Kaybı	kW

2.1.3. Bir Modüler Nükleer Reaktörün Farklı İkincil Soğutucu Akışkanlarla Soğutulması ve Güç Üretimi Modları Akış Şeması

Bu tez çalışmasının gerçekleştirilmesi için yapılmış olan kabuller doğrultusunda, tasarlanmış olan üç farklı soğutma ve güç üretimi modunun akış şemaları şekil 2.1, 2.2 ve 2.3'te sunulmuştur.

Üç farklı soğutma modunun bulunduğu çalışmada her bir modun çalışma prensibi bu kısımda anlatılacaktır. Bu üç mod şu şekildedir.

1- Birinci mod:

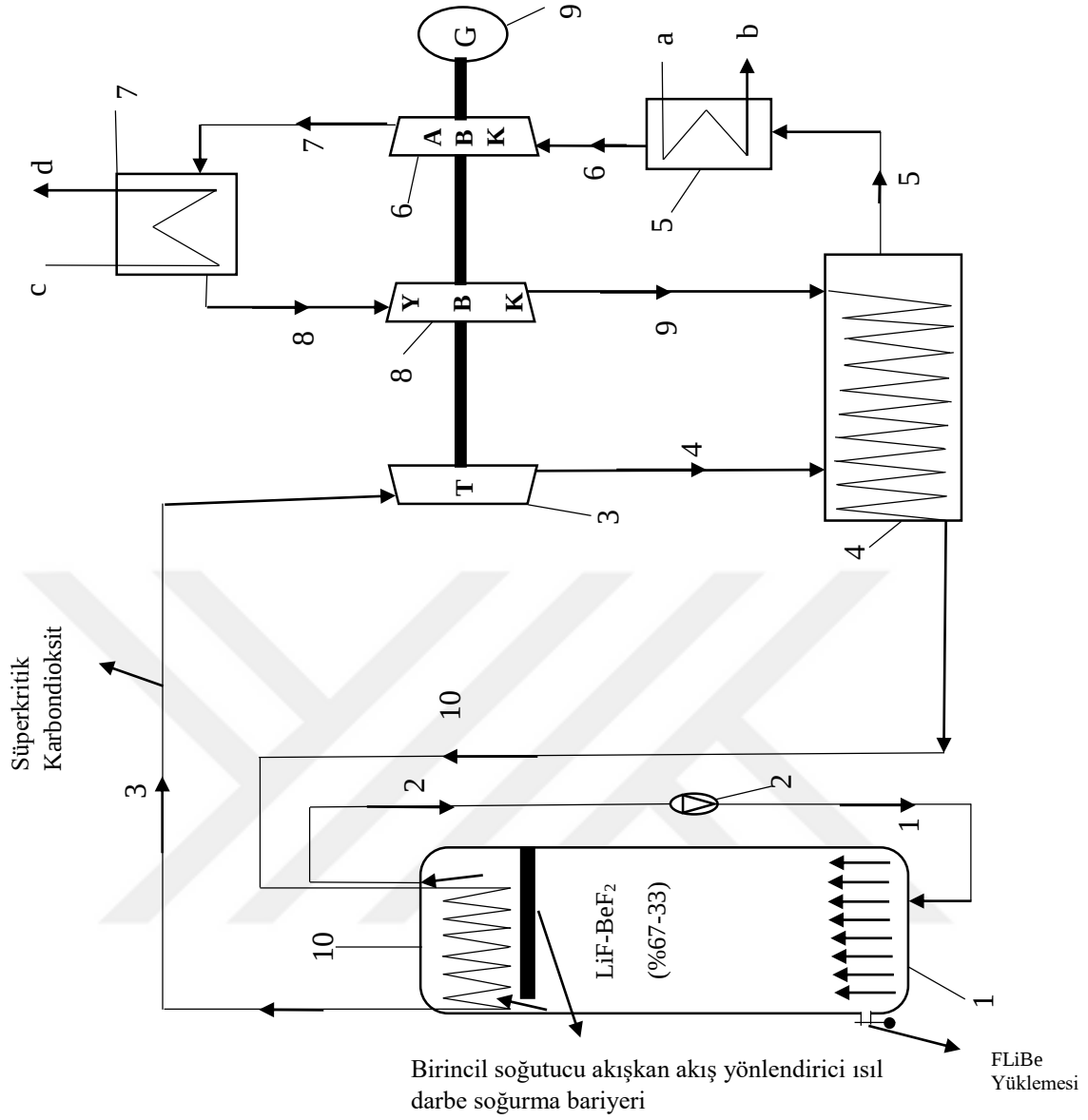
LiF-BeF₂ birincil soğutucu akışkanı ile soğutulan küçük ölçekli modüler nükleer reaktörün süperkritik karbondioksit ikincil soğutucu akışkanı ile eş zamanlı soğutulması ve güç üretimi

2- İkinci mod:

LiF-BeF₂ birincil soğutucu akışkanı ile soğutulan küçük ölçekli modüler nükleer reaktörün süperkritik su ikincil soğutucu akışkanı ile eş zamanlı soğutulması ve güç üretimi

3- Üçüncü mod

LiF-BeF₂ birincil soğutucu akışkanı ile soğutulan küçük ölçekli modüler nükleer reaktörün süperkritik karbondioksit, LiF-NaF-KF ve süperkritik su ile eş zamanlı soğutulması ve güç üretimi



Şekil 1. s-CO₂ soğutmalı tuz reaktörü (1. Reaktör kabı, 2. Tuz Sirkülasyon Pompası 3. Süperkritik Türbin, 4. Reküperatör, 5. Eşanjör, 6. Alçak Basınç Kompresörü, 7. Eşanjör, 8. Yüksek Basınç Kompresörü, 9. Jeneratör, 10. Entegre ısı eşanjörü)

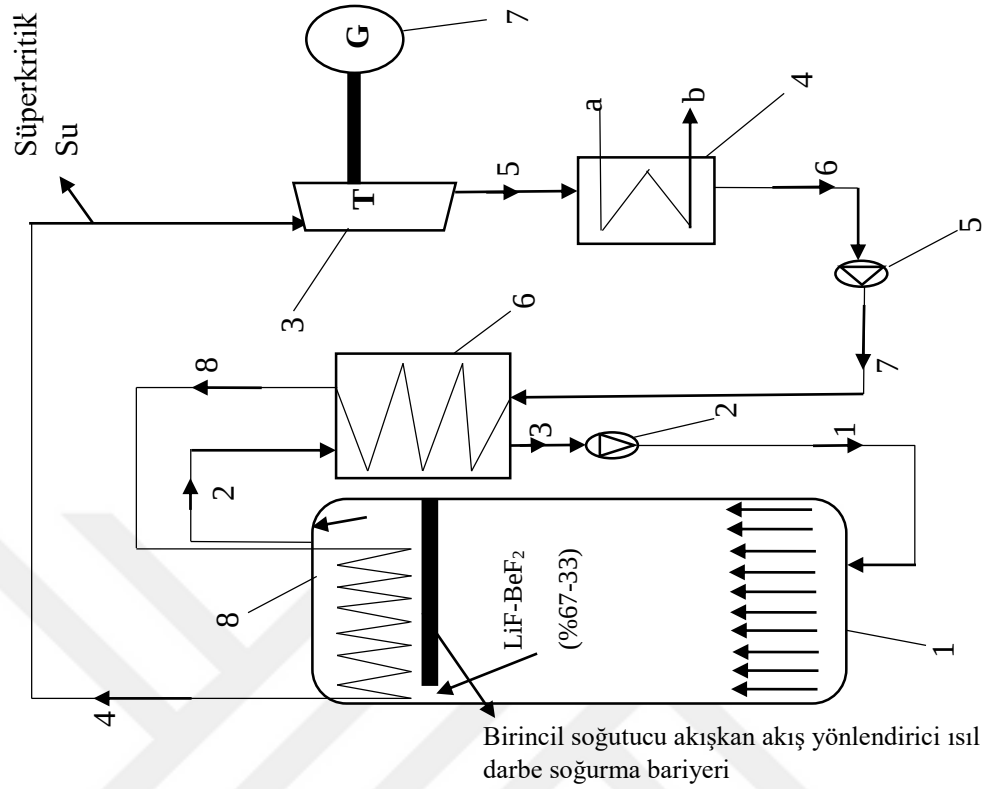
Birinci modda reaktörün kor kısmı (1) pompa (2) ile reaktör boyunca dolaştırılan 34 kg/s debisindeki erimiş FLiBe tuzu ile soğutulur. Kori soğutmasıyla birlikte ısınan FLiBe tuzu birincil soğutucu akışkan akış yönlendirici ısıl darbe soğurma bariyeri vasıtasıyla reaktör kabına entegre ısı değiştiriciye (10) gider. Reaktöre entegre ısı değiştiricide (10) dolaştırılan erimiş FLiBe tuzu, 22,8 kg/s debisindeki s-CO₂ yardımıyla soğutularak sirkülasyon pompası (2) vasıtasıyla tekrar sisteme geri gönderilir. FLiBe tuzu ile ısı alış verişi gerçekleştiren s-CO₂, sıcaklığı artmış şekilde ısı değiştiriciyi (10) terk

ederek gaz türbinine (3) girer. Türbin (3) s-CO₂'in kinetik ve potansiyel enerjisini mekanik enerjiye çevirir. Türbinde elde edilen mekanik enerji jeneratörde (9) elektrik enerjisine dönüştürülür. Türbinden çıkan s-CO₂ önce reküperatöre (4) sonrasında birinci eşanjöre (5) girer. Eşanjörde (5) 13 kg/s'lik debiyle bir miktar soğutulan s-CO₂ önce alçak basınç kompresörüne (6) girerek belli bir oranda basınçlandırılır ve ikinci eşanjöre (7) gönderilir. Burada tekrar soğutulan akışkan yüksek basınç kompresörüne (8) girerek istenilen basınca getirilir. İkinci eşanjördeki suyun debisi ise 1,4 kg/s'dir. Her iki kompresörde de basınçlandırma sonrası akışkanın sıcaklığı bir miktar artar. Kompresörden (8) çıkan akışkan reküperatöre (4) girer ve türbinden (4) çıkan akışkan ile ısı alış verişi yaptıktan sonra tekrar reaktör kabına entegre ısı değiştiricisine (10) girerek çevrimi tamamlamış olur.

Birinci modun literatürden farkları şu şekildedir. Birincil soğutucu akışkan akış yönlendirici tek kademeli ısı darbe yönetim bariyeri ile reaktöre entegre s-CO₂ içeren ısı değiştirici etkileşimi düşünülmüş ve böylece sistemde eş zamanlı soğutma yapılması planlanmıştır.

Tablo 5. s-CO₂ soğutmalı tuz reaktörü için çevrimdeki basınç ve sıcaklıklar

No	Akışkan	Basınç (MPa)	Sıcaklık (K)
1	FLiBe	0,1	1200
2	FLiBe	0,1	1200
3	s-CO ₂	22,1	883
4	s-CO ₂	~9,2	~725
5	s-CO ₂	~9,2	324
6	s-CO ₂	~9,2	305
7	s-CO ₂	~12,2	~309
8	s-CO ₂	~12,2	305
9	s-CO ₂	22,1	~316
10	s-CO ₂	22,1	612
a	Su	0,1	298
b	Su	0,1	343
c	Su	0,1	298
d	Su	0,1	343



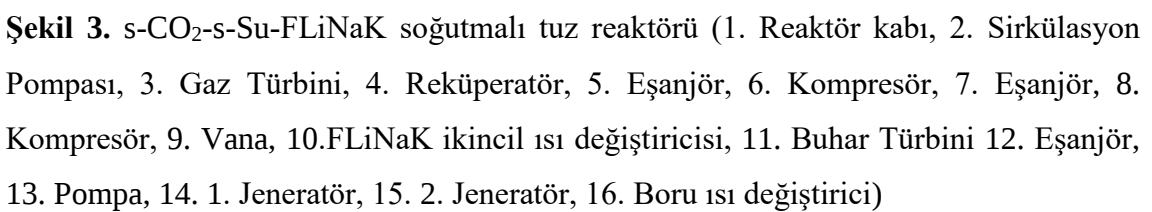
Şekil 2. s-Su soğutmalı tuz reaktörü (1. Reaktör kabı, 2. Tuz Sirkülasyon Pompası, 3. Türbin, 4. Eşanjör, 5. Pompa, 6. Boru ısı değiştiricisi, 7. Jeneratör, 8. Entegre ısı değiştirici)

İkinci modda reaktör kabı (1) birinci modda olduğu gibi 34 kg/s' lik FLiBe tuzu ile soğutulur. Isınan FLiBe tuzu birincil soğutucu akışkan akış yönlendirici ısıl darbe soğurma bariyeri vasıtasıyla reaktör kabına entegre ısı değiştiricisine (8) gider. Burada erimiş FLiBe tuzu 2,23 kg/s debisindeki s-Su yardımıyla soğutularak bir sirkülasyon pompası (2) vasıtasıyla boru ısı değiştiricide (8) ısıtılarak tekrar sisteme gönderilir. FLiBe tuzu ile ısı alışverişi gerçekleştiren s-Su sıcaklığı artmış şekilde ısı değiştiriciyi (8) terk ederek buhar türbinine (3) girer. Türbin (3), süperkritik fazda gelen akışkanın kinetik ve potansiyel enerjisini mekanik enerjiye çevirir. Türbinde elde edilen mekanik enerji jeneratörde (7) elektrik enerjisine dönüştürülür. Türbinden (3) buhar olarak çıkan akışkan kondensere (4) gönderilir. Kondenserde (4) 23 kg/s' lik debiyle bir miktar soğutulan akışkan, pompaya (5) gelmeden tam olarak sıvı hale getirilir. Bu sıvı, pompa (5) yardımıyla basınçlandırılır. Basınçlandırılan akışkan önce boru değiştiricisine (6) sonra reaktör kabına entegre ısı değiştiricisine (8) girer ve çevrim tamamlanmış olur.

İkinci modun literatürden farkları şu şekildedir. Birincil soğutucu akışkan akış yönlendirici tek kademeli ısı darbe yönetim bariyeri ile reaktöre entegre s-Su içeren ısı değiştirici etkileşimi düşünülmüş ve böylece sistemde eş zamanlı soğutma yapılması planlanmıştır.

Tablo 6. s-Su soğutmalı tuz reaktörü çevrimdeki basınç ve sıcaklıklar

No	Akışkan	Basınç (MPa)	Sıcaklık (K)
1	FLiBe	0,1	1190
2	FLiBe	0,1	1200
3	FLiBe	0,1	1190
4	s-Su	25	1050
5	Buhar	~0,008	305
6	Su	~0,008	305
7	Su	25	~305
8	Su	25	395
a	Su	0,1	298
b	Su	0,1	343



Üçüncü mod ise yukarıda anlatılan üç farklı soğutucunun tek reaktör kabında kullanılmasıyla oluşur. Reaktör kabı (1) FLiBe tuzu ile soğutulur. Kor bölgesini soğutmasıyla birlikte ısınan FLiBe tuzu reaktör kabına entegre üç farklı akışkan ile sırayla ısı transferi gerçekleştirerek reaktör giriş sıcaklığına düşer ve sirkülasyon pompası (2) yardımıyla tekrar sisteme gönderilir. Her bir akışkan yukarıda anlatılan kendilerine özgü güç üretim sistemlerine gönderilerek elektrik üretimini sağlar.

Üçüncü modun literatürden farkları şu şekildedir. Birincil soğutucu akışkan akış yönlendirici üç kademeli ısı darbe yönetim bariyeri ile reaktöre entegre üç ısı değiştirici etkileşimi düşünülmüş ve böylece sistemde eş zamanlı kademeli soğutma yapılması planlanmıştır.

Tablo 7. s-CO₂-s-Su-FLiNaK soğutmalı tuz reaktörü çevrimdeki basınç ve sıcaklıklar

No	Akışkan	Basınç (MPa)	Sıcaklık (K)
1	FLiBe	0,1	1200
2	FLiBe	0,1	1200
3	s-CO ₂	22,1	883
5	s-CO ₂	~9,2	~726
6	s-CO ₂	~9,2	317
7	s-CO ₂	~9,2	305
8	s-CO ₂	~12,2	~310
9	s-CO ₂	~12,2	305
10	s-CO ₂	~12,2	~317
11	s-CO ₂	~22,1	641
12	s-Su	25	1050
13	Buhar	~0,008	305
14	Sıvı	~0,008	305
15	Sıvı	25	~305
16	Sıvı	25	500

2.2. Termodinamik Çalışmalar

Termodinamik analiz çalışmaları kapsamında, tasarlanan çalışma modlarının enerji ve ekserji analizi çalışmaları yapılmıştır.

2.2.1. Üç Farklı Moddan Güç Üretimi İçin Hesaplamalar

SMR'e entegre üç farklı soğutma modundan güç üretimi ve her bir elemanın enerji ve ekserji hesaplamalarının yapılması için hesaplamalar kısmında aşağıda belirtilen değerlerin hesaplanması yer almaktadır.

2.2.1.1. Yakıt Miktarı

Termodinamik açıdan kıyaslanan üç farklı modda soğutulan nükleer reaktörün kor bölgesinde kullanılan yakıt miktarı, aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$\dot{Q}_{KYFE} = \dot{m}_{YM} x \dot{Q}_{FOE} \quad (2.1)$$

$$\dot{Q}_{th} = \frac{W_{Elk}}{\xi_r} \quad (2.2)$$

Denklem 2.3, 2.4, 2.5 Caretto (2009)' dan faydalanarak yazılmıştır.

$$\dot{Q}_{YIEG} = K_f x \dot{Q}_{th} x Y\dot{ÇS} \quad (2.3)$$

$$\dot{m}_U = \frac{\dot{Q}_{YIEG}}{\dot{Q}_{KYFE}} \quad (2.4)$$

$$\dot{m}_{UN} = \frac{\frac{AU+AN}{AU}}{\dot{m}_U} \quad (2.5)$$

$\dot{Q}_{KYFE}$, kullanılan yakıtın fisyonundan ortaya çıkan enerji, $\dot{m}_{YM}$ nükleer yakıtın içerdiği uranyum miktarı, $\dot{Q}_{FOE}$ yakıtın fisyonundan ortaya çıkan enerji, $\dot{W}_{Elk}$ elektriksel güç, ξ_r reaktörün verimi, $\dot{Q}_{YIEG}$ yıllık ısı enerjisi Girişi, K_f kapasite faktörü, $\dot{Q}_{th}$ termal

güç, YÇS yıllık çalışma süresi, $\dot{m}_U$ kullanılan uranyum miktarı, $\dot{Q}_{YIEG}$ yıllık ısı enerjisi girişi, $\dot{m}_{UN}$ kullanılan uranyum nitrit miktarı, AU uranyumun atom ağırlığı, AN azotun atom ağırlığı, $\dot{m}_U$ kullanılan uranyum miktarı olarak tanımlanmıştır.

2.2.1.1.1. Örnek Hesaplama

Reaktöre yüklenen 1 kg uranyum yakıtındaki U_{235} konsantrasyonu %3'ten %0,8'e düşürüldüğünü kabul edelim. Bunun anlamı, yüklenen uranyumun kg'ı başına 0,03 – 0,008 = 0.022 kg U_{235} fisyona girecektir. Fisyona uğrayan U_{235} yakıtından $(0,022) \times (7,54 \times 10^7) = 1,66 \times 10^6$ MJ/kg enerji açığa çıkar. Yakıt hesaplaması yapılan reaktörün termal gücünün 8,1 MW olduğu ve %95 kapasiteyle çalıştığı kabul edilirse yıl boyunca toplam ısı enerjisi $(95\%) (8,1 \text{ MJ/s}) (3600 \text{ saniye/saat}) (24 \text{ saat/gün}) (365 \text{ gün/yıl}) = 2,42 \times 10^8$ MJ/yıl olur. Buradaki enerjiye karşılık gelen gerekli uranyum kütlesi $(2,42 \times 10^8 \text{ MJ/yıl}) / (1,66 \times 10^6 \text{ MJ/kg}) = 146,3 \text{ kg/yıl}$ olarak bulunur. Uranyum miktarı baz alınarak yapılan hesaplamalarda UN miktarı $(1,117) \times (145,8 \text{ kg/yıl}) = 163,4 \text{ kg/yıl}$ dır.

2.2.1.2. FLiBe ve FLiNaK tuzlarının entalpisinin ve entropisinin hesaplanması

Enerji ve ekserji hesaplamalarında kullanılan entalpi ve entropi değerleri bazı akışkanlar için literatürde sıcaklık ve basınçlarına bağlı olarak verilmiştir. Ancak erimiş tuzların entalpi ve entropi değerinin verildiği herhangi bir literatür bilgisi bulunmamaktadır. Formüllerde yer alan bazı değerler literatürde bulunurken bazıları ise hesaplama yöntemiyle elde edilmiştir (Liu vd., 2017). Bu doğrultuda erimiş tuzların entalpi ve entropisinin hesaplanması için aşağıdaki formüller kullanılmaktadır (Liu vd., 2016).

$$\rho^T = A_{m,l}(T - 273,15) + B_{m,l} \quad (2.6)$$

$$k = C_{m,l}^k \exp(D_{m,l}^k \cdot T) \quad (2.7)$$

$$\bar{P} = 1 + \kappa(P - P_0) \quad (2.8)$$

$$\log\left(\frac{P_0}{133,322}\right) = 9,04 - \frac{10500}{T_0} \quad (2.9)$$

$$h = c_p(T - T_0) + \ln\bar{P} \left[\frac{1}{\rho^T k} + \frac{T A_{m,l}}{(\rho^T)^2 k} - \frac{T D_{m,l}^k}{\rho^T k} \right] + \frac{T D_{m,l}^k (P - P_0)}{\rho^T \bar{P}} + h l_0 \quad (2.10)$$

$$s = c_p \ln\left(\frac{T}{T_0}\right) + \ln\bar{P} \left[\frac{A_{m,l}}{(\rho^T)^2 k} - \frac{D_{m,l}^k}{\rho^T k} \right] + \frac{D_{m,l}^k (P - P_0)}{\rho^T \bar{P}} + s l_0 \quad (2.11)$$

Denklem 2.6, 2.7, 2.8, 2.9, 2.10, 2.11 Liu vd., (2016) ve Liu vd. (2017)' den alınmıştır.

Bu denklemlerde h entalpi, s entropi, $A_{m,l}$, $B_{m,l}$, $C_{m,l}$ ve $D_{m,l}$ tuz türüne bağlı sabitler, c_p akışkan tuzun spesifik ısı kapasitesi, k izotermal sıkıştırılabilirlik ρ^T (kg/m³) akışkanın yoğunluğudur (Liu vd., 2016).

Tuz için T_0 ve P_0 değerleri üçlü nokta sıcaklık ve basıncıdır. Üçlü noktada sıcaklık değeri olarak ilgili tuzun erime noktası sıcaklığı alınır ve buna bağlı olarak o noktadaki basınç değeri hesaplanır. Yine denklemlerde yer alan $h l_0$ ve $s l_0$ ise kullanılan soğutucu akışkanın üçlü noktada ki entalpi ve entropi değerleridir (Liu vd., 2017).

2.2.1.3. Sıkıştırılabilirlik Faktörü

Sıkıştırılabilirlik faktörünün hesaplanmasında Benedict-Webb-Rubin eşitliği ve sabitleri kullanılır. Birbirine bağlı olan yoğunluk ve sıkıştırılabilirlik denklemlerinin iteratif olarak çözümlenmesiyle hesaplamalar yapılır.

$$\rho = \frac{100 * P_g}{Z * R * T_g} \quad (2.12)$$

$$Z = 1 + \left(B_0 - \frac{A_0}{R_u T_g} - \frac{C_0}{R_u T_g} \right) \rho + \left(b - \frac{a}{R_u T_g} \right) \rho^2 + \frac{a\alpha}{R_u T_g} \rho^5 + \frac{c}{R_u T_g} \rho^2 [(1 + \gamma \rho^2) \exp(-\gamma \rho^2)] \quad (2.13)$$

Denklem 2.12 ve 2.13 Özsaban (2009) ve Çengel ve Boles (2015)'ten alınmıştır.

Bu denklemlerde yer alan Z sıkıştırılabilirlik faktörü, ρ gazın yoğunluğu, R_u üniversal gaz sabiti T_g giriş sıcaklığı, P_g giriş basıncı, R kullanılan gaz için gaz sabiti ve $A_0, B_0, C_0, a, b, c, \alpha, \gamma$ değerleri Benedict-Webb-Rubin eşitliğindeki sıkıştırılabilirlik faktörü sabitleridir (Çengel ve Boles,2015; Wark,1983).

2.2.1.3.1. Örnek Hesaplama

Türbine 22100 kPa basınç ve 750K sıcaklıkta giren bir CO_2 gazının sıkıştırılabilirlik faktörü hesaplanmaktadır. Bu kısımda birbirine bağlı olan ρ ve Z değerleri iteratif bir şekilde çözülerek gerçek gaz için sıkıştırılabilirlik faktörü hesaplanacaktır. Bu hesaplamalarda gerekli olan CO_2 için Benedict-Webb-Rubin sabitleri Tablo 2’de verilmiştir. Denklem 2.12 ve 2.13’te sabit değerler yerine konulur. Giriş sıcaklık ve basınç değerlerine göre yapılan hesaplamalarda sıkıştırılabilirlik faktörü 0,9895 olarak bulunur.

2.2.2. Enerji ve Ekserji Analizi

Bu kısımda genel olarak bir sistemde meydana gelen kütle, enerji ve ekserji transfer mekanizmalarından bahsedilmiştir. Elektrik üretiminin inceleneceği üç farklı moddaki her bir parça için yapılacak enerji ve ekserji analizi incelemeleri için gerekli alt başlıklar aşağıda sunulmuştur. Enerji analizleri Termodinamiğin Birinci Kanunu kapsamında, ekserji analizleri ise Termodinamiğin İkinci Kanunu kapsamında yapılmıştır. Enerji ve ekserji denklemleri, modlardaki her bir alt ünitenin kontrol hacimlerine bağlı olarak derlenmiş ve hesaplamalar için ayrı ayrı kullanılmıştır. Üç farklı moddaki soğutma ve güç üretimi sisteminin termodinamik açıdan incelemesi yapılırken bileşenlerin çizilen kontrol hacmi boyunca sürekli akış rejiminde olduğu ve akışkan özelliklerinin bir noktadan başka noktaya değişiklik göstermesine karşın her noktadaki değerin zaman açısından değerlendirilmeyerek herhangi bir anda sabit kaldığı kabul edilmiştir.

Dolayısıyla, bu tez çalışması kapsamında ele alınan küçük ölçekli tuz soğutmalı modüler nükleer reaktör için geliştirilen her bir modda bulunan reaktör, pompa, türbin, kompresör, ısı değiştirici, buhar üretici, ısıtıcı, soğutucu ve yoğunlaştırıcı gibi sürekli

akışlı elemanların enerji ve ekserji denge eşitlikleriyle ilgili aşağıdaki genel yaklaşım ortaya konulmuştur.

$$\sum \dot{m}_g - \sum \dot{m}_\zeta = \frac{dm}{dt} = 0 \quad (2.14)$$

$$\sum \dot{m}_g = \sum \dot{m}_\zeta \quad (2.15)$$

Enerji korunumu prensibinden yola çıkarak enerji dengesi şu şekilde yazılır.

$$\sum \dot{E}_g - \sum \dot{E}_\zeta = \frac{dE}{dt} = 0 \quad (2.16)$$

Bu durumda

$$\sum \dot{E}_g = \sum \dot{E}_\zeta \quad (2.17)$$

Toplam giren enerji akımı değeri

$$\sum \dot{E}_g = \sum \dot{E}_g^m + \sum \dot{E}_g^Q + \sum \dot{E}_g^W \quad (2.18)$$

Toplam çıkan enerji akımı değeri

$$\sum \dot{E}_\zeta = \sum \dot{E}_\zeta^m + \sum \dot{E}_\zeta^Q + \sum \dot{E}_\zeta^W \quad (2.19)$$

Kütle ile enerji transferi

$$\dot{E}^m = \dot{m}[h - h_o]_{P,T} \quad (2.20)$$

Isı ile gerçekleşen enerji akımı değeri

$$\dot{E}^Q = \dot{Q} \quad (2.21)$$

İş ile gerçekleşen enerji akımı değeri

$$\dot{E}^W = \dot{W} \quad (2.22)$$

Termodinamiğin Birinci Kanununa göre her bir alt sistemin enerji verimi aşağıdaki tanımlama çerçevesinde hesaplanmıştır.

$$\eta_I = \frac{Gaye}{Bedel} \quad (2.23)$$

Termodinamiğin İkinci Kanunu Kapsamında ekserji dengesi şu şekilde yazılır.

$$\sum \dot{E}x_g - \sum \dot{E}x_\zeta - \sum \dot{E}x_L = \frac{dEx}{dt} = 0 \quad (2.24)$$

Sistemdeki ekserji dengesi

$$\sum \dot{E}x_g = \sum \dot{E}x_\zeta + \sum \dot{E}x_L \quad (2.25)$$

Sisteme giren toplam ekserji akımı değeri

$$\sum \dot{E}x_g = \sum \dot{E}x_g^m + \sum \dot{E}x_g^Q + \sum \dot{E}x_g^W \quad (2.26)$$

Sistemden çıkan toplam ekserji akımı değeri

$$\sum \dot{E}x_\zeta = \sum \dot{E}x_\zeta^m + \sum \dot{E}x_\zeta^Q + \sum \dot{E}x_\zeta^W \quad (2.27)$$

Sisteme kütle girişi veya kütle çıkışı ile gerçekleşen ekserji transferi

$$\sum \dot{E}x^m = \dot{E}x_g^{fiz} + \dot{E}x_g^{kim} \quad (2.28)$$

Fiziksel ekserji değeri akışkanın basınç ve sıcaklığına bağlı olarak

$$\dot{E}x^{fiz} = \dot{m}[(h - h_o) - T_\infty(s - s_o)]_{P,T} \quad (2.29)$$

Akışkanın kimyasal ekserji akımı değeri,

$$\dot{E}x^{kim} = \dot{m}ex^{kim} \quad (2.30)$$

Referans çevre sıcaklığının T_∞ olduğu ortamda, T_s sıcaklığına sahip sistemde, sistem sınırından ısı ile gerçekleşen ekserji akımı değeri,

$$\dot{E}x^Q = \dot{Q} \left(1 - \frac{T_\infty}{T_s} \right) \quad (2.31)$$

Sistemde iş ile gerçekleşen ekserji akımı değeri,

$$\dot{E}x^W = \dot{W} \quad (2.32)$$

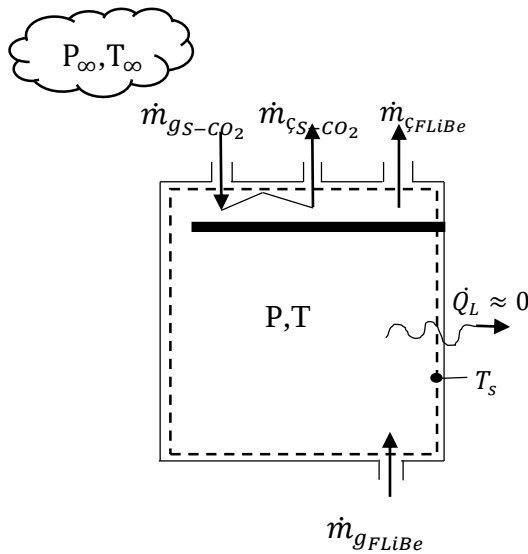
Termodinamiğin İkinci Kanununa göre her bir alt sistemin ekserji verimi aşağıdaki tanımlama çerçevesinde hesaplanmıştır.

$$\eta_I = \frac{\text{Faydalı çıktının ekserjisi}}{\text{Toplam ekserji girişi}} \quad (2.33)$$

2.2.2.1. Reaktörün Enerji ve Ekserji Analizi

Reaktör bölgesinin kor kısmında bulunan yakıt çubuklarından çok yüksek seviyede bir ısı ortaya çıkar. Soğutucu akışkanın tamamıyla bu fisyon enerjisini aldığı kabul edilmiştir. Bu ısının tamamen soğutucu akışkan tarafından alındığını kabul edilerek her bir modda reaktöre yerleştirilen eşanjöre aktarılan enerji aşağıdaki yaklaşımla hesaplanabilir. Burada yapılan hesaplamalarda reaktöre yerleştirilen ısı eşanjörünün etkinliği %95 kabul edilmiştir. Ayrıca, reaktör yüzeylerinden ısı ve kütle kaybının da olmadığı kabul edilmiştir. Bu durumda,

MOD 1’de Reaktörün Enerji ve Ekserji Analizi



$$P_{\infty} = 0,101325 \text{ MPa}$$

$$T_{\infty} = 298,15 \text{ K}$$

$$\dot{Q}_L \approx 0$$

$$\dot{m}_{gFLiBe} = \dot{m}_{\çFLiBe} = 34 \text{ kg/s}$$

$$\dot{m}_{gS-CO_2} = \dot{m}_{\çS-CO_2} = 22,8 \text{ kg/s}$$

$$P = 0,1 \text{ MPa}$$

$$T = 1300 \text{ K}$$

Şekil 4. MOD-1 reaktör kabı kontrol hacmi

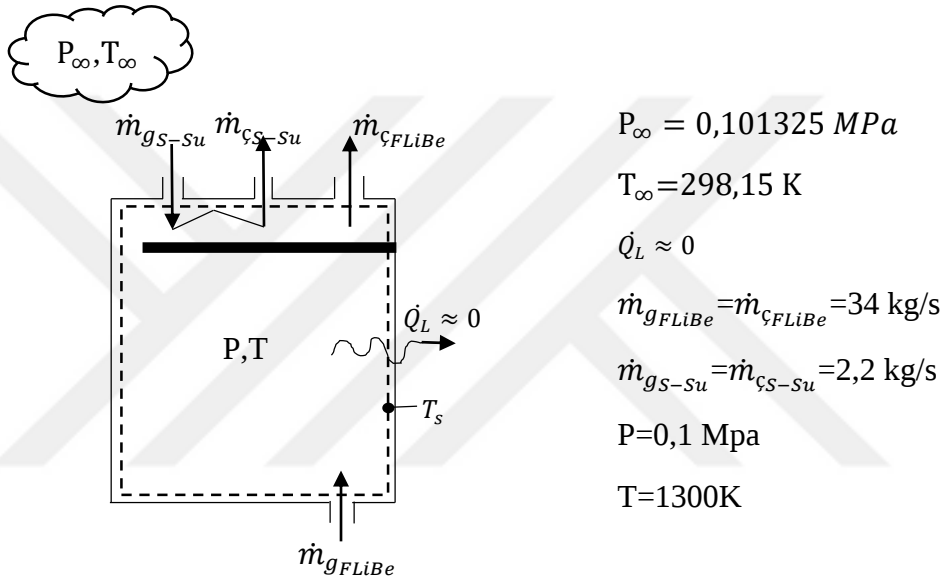
$$\text{Kütle: } \dot{m}_{g_{FLiBe}} = \dot{m}_{\zeta_{FLiBe}} \quad (2.34)$$

$$\dot{m}_{g_{S-CO_2}} = \dot{m}_{\zeta_{S-CO_2}}$$

$$\text{Enerji: } \dot{m}_{g_{FLiBe}} h_{g_{FLiBe}} + \dot{m}_{g_{S-CO_2}} h_{g_{S-CO_2}} = \dot{m}_{\zeta_{FLiBe}} h_{\zeta_{FLiBe}} + \dot{m}_{\zeta_{S-CO_2}} h_{\zeta_{S-CO_2}} \quad (2.35)$$

$$\text{Ekserji: } \dot{m}_{g_{FLiBe}} ex_{g_{FLiBe}} + \dot{m}_{g_{S-CO_2}} ex_{g_{S-CO_2}} = \dot{m}_{\zeta_{FLiBe}} ex_{\zeta_{FLiBe}} + \dot{m}_{\zeta_{S-CO_2}} ex_{\zeta_{S-CO_2}} + \dot{E}x_L \quad (2.36)$$

MOD 2’de Reaktörün Enerji ve Ekserji Analizi



Şekil 5. MOD-2 reaktör kabı kontrol hacmi

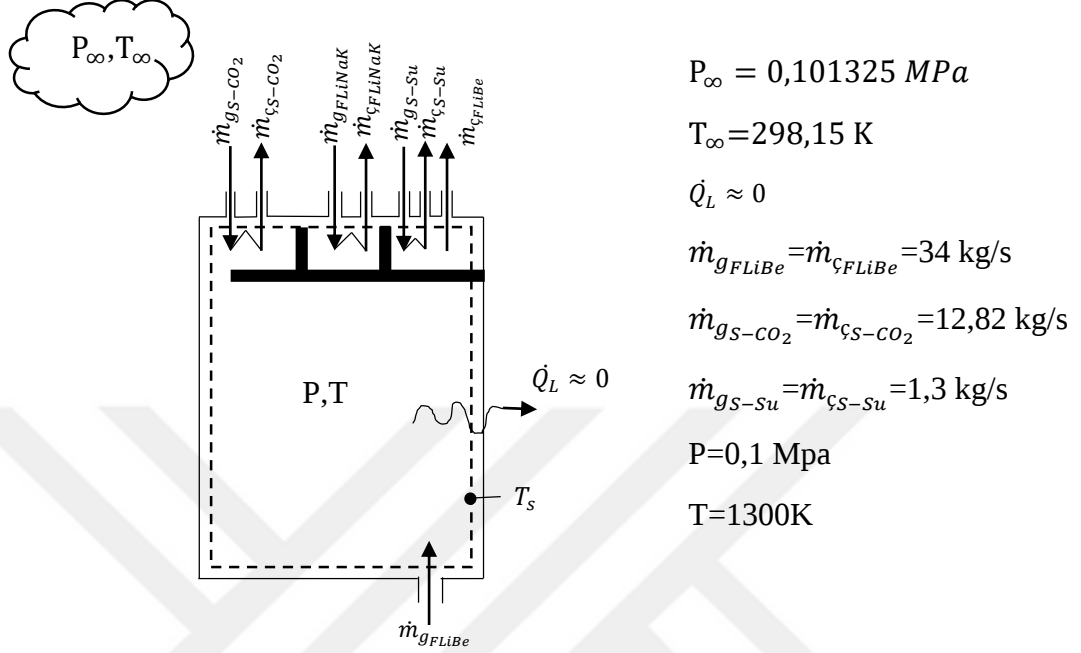
$$\text{Kütle: } \dot{m}_{g_{FLiBe}} = \dot{m}_{\zeta_{FLiBe}} \quad (2.37)$$

$$\dot{m}_{g_{S-Su}} = \dot{m}_{\zeta_{S-Su}} \quad (2.38)$$

$$\text{Enerji: } \dot{m}_{g_{FLiBe}} h_{g_{FLiBe}} + \dot{m}_{g_{S-Su}} h_{g_{S-Su}} = \dot{m}_{\zeta_{FLiBe}} h_{\zeta_{FLiBe}} + \dot{m}_{\zeta_{S-Su}} h_{\zeta_{S-Su}} \quad (2.39)$$

$$\text{Ekserji: } \dot{m}_{g_{FLiBe}} ex_{g_{FLiBe}} + \dot{m}_{g_{S-Su}} ex_{g_{S-Su}} = \dot{m}_{\zeta_{FLiBe}} ex_{\zeta_{FLiBe}} + \dot{m}_{\zeta_{S-Su}} ex_{\zeta_{S-Su}} + \dot{E}x_L \quad (2.40)$$

MOD 3’de Reaktörün Enerji ve Ekserji Analizi



Şekil 6. MOD-3 reaktör kabı kontrol hacmi

$$\text{Kütle: } \dot{m}_{gFLiBe} = \dot{m}_{cFLiBe} \quad (2.45)$$

$$\dot{m}_{gS-CO_2} = \dot{m}_{cS-CO_2} \quad (2.46)$$

$$\dot{m}_{gFLiNaK} = \dot{m}_{cFLiNaK} \quad (2.47)$$

$$\dot{m}_{gS-Su} = \dot{m}_{cS-Su} \quad (2.48)$$

$$\begin{aligned} \text{Enerji: } \dot{m}_{gFLiBe} h_{gFLiBe} + \dot{m}_{gFLiNaK} h_{gFLiNaK} + \dot{m}_{gS-CO_2} h_{gS-CO_2} + \dot{m}_{gS-Su} h_{gS-Su} = \\ \dot{m}_{cFLiBe} h_{cFLiBe} + \dot{m}_{cFLiNaK} h_{cFLiNaK} + \dot{m}_{cS-CO_2} h_{cS-CO_2} + \dot{m}_{cS-Su} h_{cS-Su} \end{aligned} \quad (2.49)$$

$$\begin{aligned} \text{Ekserji: } \dot{m}_{gFLiBe} ex_{gFLiBe} + \dot{m}_{gFLiNaK} ex_{gFLiNaK} + \dot{m}_{gS-CO_2} ex_{gS-CO_2} + \dot{m}_{gS-Su} ex_{gS-Su} = \\ \dot{m}_{cFLiBe} ex_{cFLiBe} + \dot{m}_{cFLiNaK} ex_{cFLiNaK} + \dot{m}_{cS-CO_2} ex_{cS-CO_2} + \dot{m}_{cS-Su} ex_{cS-Su} + \dot{E}_L \end{aligned} \quad (2.50)$$

Burada (2.49) ve (2.50) nolu denklemlerde Mod 3’ün çalışma prensibine bağlı olarak FLiNaK akışkanlı soğutma devrede ise o zaman denklemde s-CO₂ ile ilgili

değerler dikkate alınmaz. s-CO₂ akışkanlı soğutma devrede ise o zaman denklemde FLiNaK ile ilgili değerler dikkate alınmaz.

2.2.2.2. Süperkritik Türbinde Enerji ve Ekserji Analizi

Reaktör bölgesinde bulunan ısı değiştiricide ısınan s-CO₂ süperkritik türbine gelir. Burada genişleyerek daha düşük basınç ve sıcaklığa ulaşır. Türbine giriş sıcaklığı, giriş basıncı ve çıkış basıncı bilinen s-CO₂'in türbin çıkış sıcaklığı aşağıdaki denklemle hesaplanır (Akbulut ve Midilli, 2017).

$$T_{\zeta} = T_g \left(\frac{P_{\zeta}}{P_g} \right)^{\frac{(n-1)}{Z_t n}} \quad (2.51)$$

Bu kısımda, sıcaklık T ile, basınç P ile, politropik üs n ile, sıkıştırılabilirlik faktörü z ile gösterilmiş olup, giriş için g ve çıkış için ç alt indisleri kullanılmıştır.

Süperkritik türbinde sıkıştırılabilirlik faktörünün hesaplanmasında Benedict-Webb-Rubin eşitliği ve sabitleri kullanılır. Birbirine bağlı olan yoğunluk ve sıkıştırılabilirlik denklemlerinin iteratif olarak çözülmesiyle hesaplamalar yapılır (Özsaban, 2009; Çengel ve Boles, 2015).

$$\rho = \frac{100 * P_g}{Z_t * R * T_g} \quad (2.52)$$

$$Z_t = 1 + \left(B_0 - \frac{A_0}{R_u T_g} - \frac{C_0}{R_u T_g} \right) \rho + \left(b - \frac{a}{R_u T_g} \right) \rho^2 + \frac{a\alpha}{R_u T_g} \rho^5 + \frac{c}{R_u T_g} \rho^2 [(1 + \gamma \rho^2) \exp(-\gamma \rho^2)] \quad (2.53)$$

Hesaplanan ve belirlenen basınçlarla, sıcaklıklar dikkate alınıp termodinamik tablolara göre entalpi, entropi değerleri bulunarak termodinamik analiz aşağıdaki denklemlerle gerçekleştirilir.

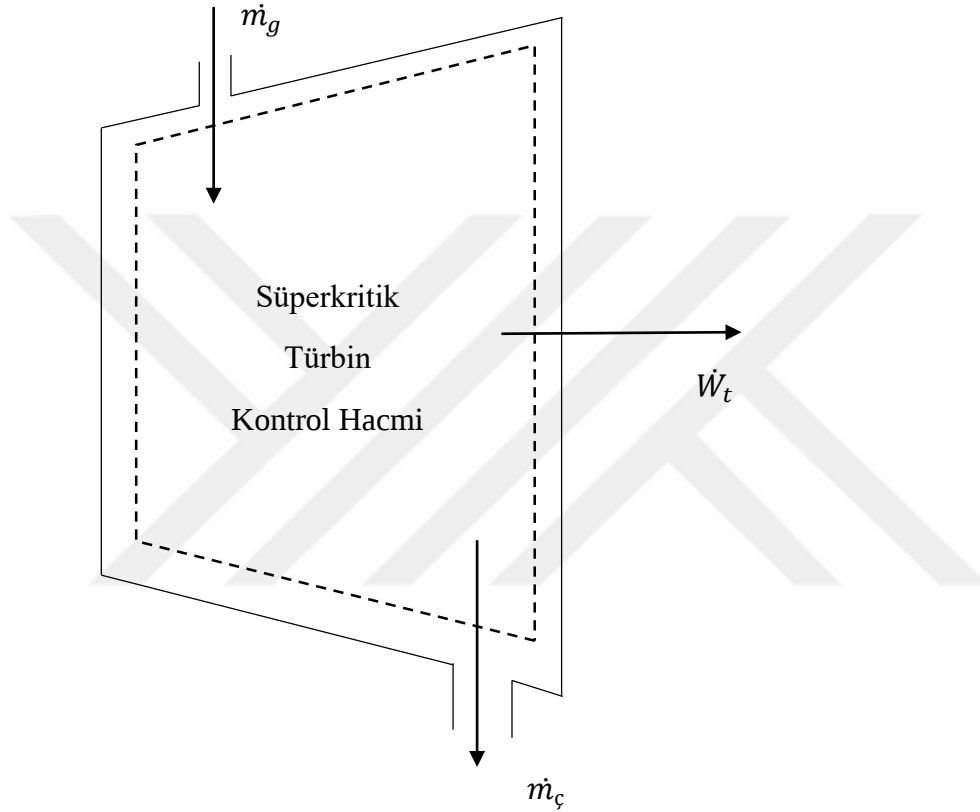
Enerji dengesi kurularak türbinden elde edilen güç,

$$\dot{W}_t = \sum \dot{m}_g h_g - \sum \dot{m}_{\zeta} h_{\zeta} \quad (2.54)$$

şeklinde hesaplanır. Ekserji kaybı ise süperkritik türbinin giriş ve çıkışındaki ekserji değerleri farkı ve üretilen işe bağlı olarak hesaplanır ve

$$\sum \dot{m}_g ex_g = \sum \dot{m}_\chi ex_\chi + \dot{W}_t + \sum \dot{E}x_L \quad (2.55)$$

şeklinde tanımlanır.



Şekil 7. Süperkritik türbinin kontrol hacmi

2.2.2.3. Buhar Türbininde Enerji ve Ekserji Analizi

Reaktör bölgesinde bulunan ısı değişiricide ısınan s-Su süperkritik hale gelir. Elektrik üretimi için buhar türbinine gelir. Burada genişleyerek daha düşük basınç ve sıcaklığa gelir. Türbine giriş sıcaklığı, giriş basıncı ve çıkış basıncı bilinen s-Su'nun türbin çıkışındaki entalpi aşağıdaki denklemlerle hesaplanır.

$$s_g = s_\chi \quad (2.56)$$

$$x_{\dot{\varsigma}} = \left(\frac{s_{\dot{\varsigma}} - s_f}{s_{fg}} \right) \quad (2.57)$$

$$h_{\dot{\varsigma}} = h_f + x_{\dot{\varsigma}} \cdot h_{fg} \quad (2.58)$$

Burada s_g giriş sıcaklık ve basıncına bağlı entropi, $s_{\dot{\varsigma}}$ türbin çıkışındaki entropi, s_f çıkış basıncına bağlı doymuş sıvının entropisi, s_{fg} çıkış basıncına bağlı buharın entropisi, h_f çıkış basıncına bağlı doymuş sıvı entalpisidir.

Hesaplanan ve belirlenen basınçlarla, sıcaklıklar dikkate alınıp termodinamik tablolara göre entalpi, entropi değerleri bulunarak termodinamik analiz aşağıdaki denklemlerle gerçekleştirilir.

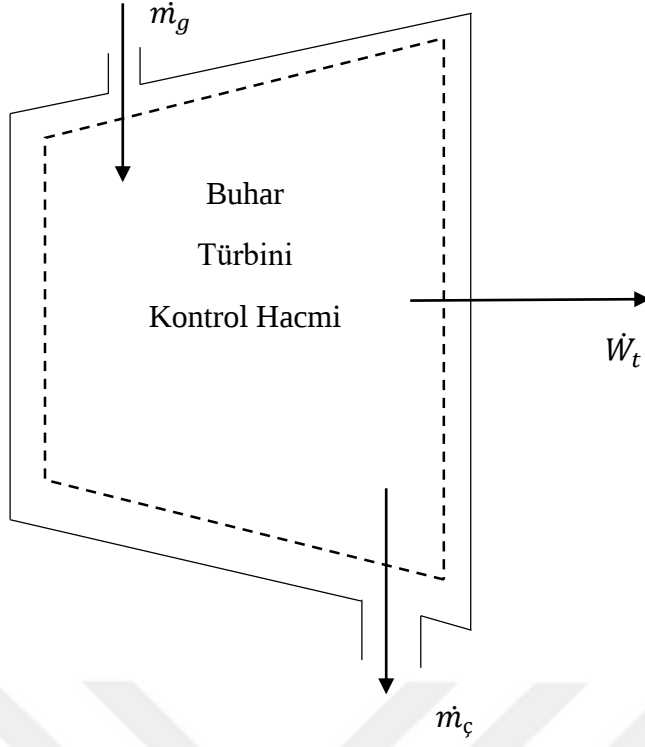
Enerji dengesi kurularak türbinden elde edilen güç,

$$\dot{W}_t = \sum \dot{m}_g h_g - \sum \dot{m}_{\dot{\varsigma}} h_{\dot{\varsigma}} \quad (2.59)$$

şeklinde hesaplanır. Ekserji kaybı ise buhar türbini giriş ve çıkışındaki ekserji değerleri farkı ve üretilen işe bağlı olarak hesaplanır ve

$$\sum \dot{m}_g ex_g = \sum \dot{m}_{\dot{\varsigma}} ex_{\dot{\varsigma}} + \dot{W}_t + \sum \dot{E}x_L \quad (2.60)$$

şeklinde tanımlanır.



Şekil 8. Buhar türbininin kontrol hacmi

2.2.2.4. Kompresörde Enerji ve Ekserji analizi

Vidalı kompresöre giriş sıcaklığı, giriş basıncı ve çıkış basıncı bilinen s-CO₂'in çıkış sıcaklığı aşağıdaki denklemle hesaplanır (Akbulut ve Midilli, 2017).

$$T_\phi = T_g \left(\frac{P_\phi}{P_g} \right)^{\frac{Z_k(n-1)}{n}} \quad (2.61)$$

Bu kısımda sıcaklık T ile, basınç P ile, politropik üs n ile, sıkıştırılabilirlik faktörü z ile gösterilmiş olup, giriş için g ve çıkış için ϕ alt indisleri kullanılmıştır.

Kompresörde sıkıştırılabilirlik faktörünün hesaplanmasında Benedict-Webb-Rubin eşitliği ve sabitleri kullanılır. Birbirine bağlı olan yoğunluk ve sıkıştırılabilirlik denklemlerinin iteratif olarak çözülmesiyle hesaplamalar yapılır (Özsaban, 2009).

$$\rho = \frac{100 \cdot P_g}{Z_k \cdot R \cdot T_g} \quad (2.62)$$

$$Z_k = 1 + \left(B_0 - \frac{A_0}{R_u T_g} - \frac{C_0}{R_u T_g} \right) \rho + \left(b - \frac{a}{R_u T_g} \right) \rho^2 + \frac{a\alpha}{R_u T_g} \rho^5 + \frac{c}{R_u T_g} \rho^2 [(1 + \gamma \rho^2) \exp(-\gamma \rho^2)] \quad (2.63)$$

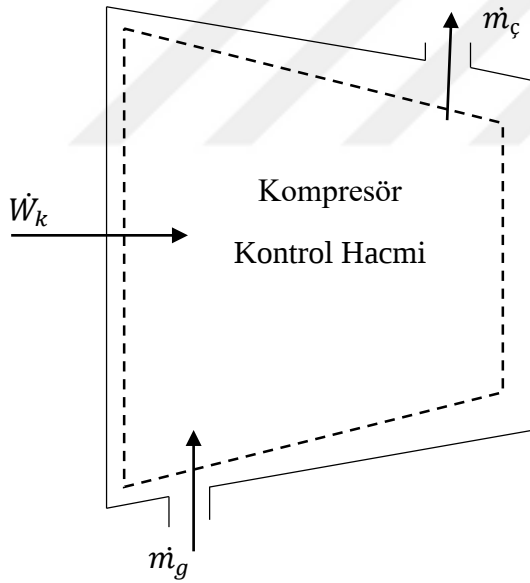
Enerji dengesi kurularak kompresörde harcanan güç,

$$\dot{W}_k = \sum \dot{m}_\phi h_\phi - \sum \dot{m}_g h_g \quad (2.64)$$

şeklinde hesaplanır. Ekserji kaybı ise kompresör giriş ve çıkışındaki ekserji değerleri farkı ve üretilen işe bağlı olarak hesaplanır ve

$$\sum \dot{m}_g ex_g + \dot{W}_k = \sum \dot{m}_\phi ex_\phi + \sum \dot{E}x_L \quad (2.65)$$

şeklinde tanımlanır.



Şekil 9. Kompresörün kontrol hacmi

2.2.2.5. Pompada Enerji ve Ekserji Analizi

İkinci modda kondenserden çıkan akışkanı tekrar reaktöre entegre ısı değiştiriciye gönderme işi pompa tarafından sağlanır. Pompada giriş ve çıkış sıcaklığının aynı olduğu

kabul edilir. Pompa, türbin çıkışında belli bir basınca düşen akışkanın tekrar ısı değiştiriciye gönderilmesi için gerekli basınca çıkartma işlemini gerçekleştirir.

Enerji dengesi kurularak pompada harcanan güç,

$$\dot{W}_p = \sum \dot{m}_c h_c - \sum \dot{m}_g h_g \quad (2.66)$$

şeklinde elde edilir.

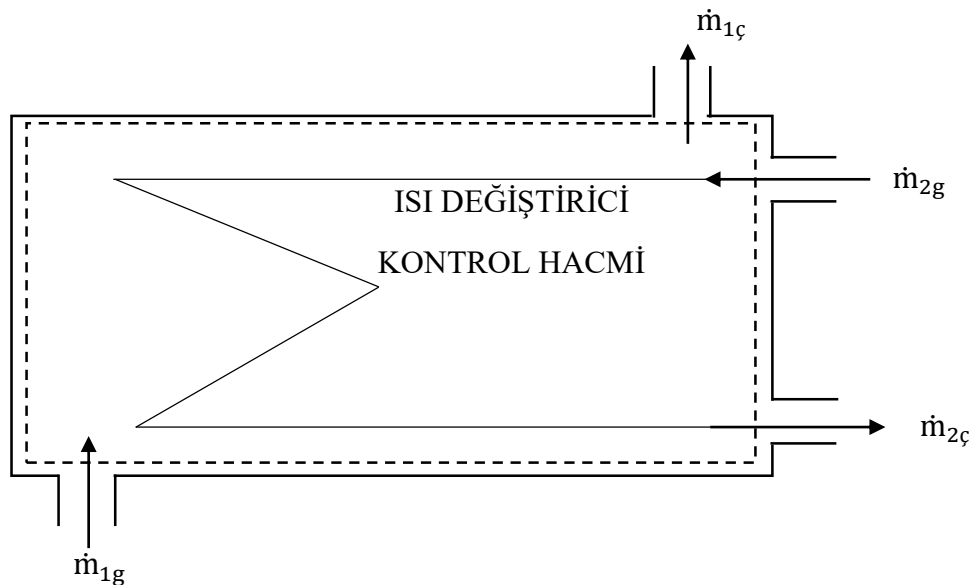
Ekserji kaybı ise pompa giriş ve çıkışındaki ekserji değerleri farkı ve üretilen işe bağlı olarak hesaplanır ve

$$\sum \dot{m}_g ex_g + \dot{W}_p = \sum \dot{m}_c ex_c + \sum \dot{E}_{xL} \quad (2.67)$$

şeklinde tanımlanır.

2.2.2.6. Isı Değiştirici ve Reküperatörde Enerji ve Ekserji Analizi

Isı değiştirici, reküperatör ve kondenserlerde ısı geçişi sırasında varsayılan tersinir iş, birim zamandaki tersinmez güce eşittir. Reaktörde bulunan bu elemanlarda ısı geçişi esnasında yararlı güç yoktur.

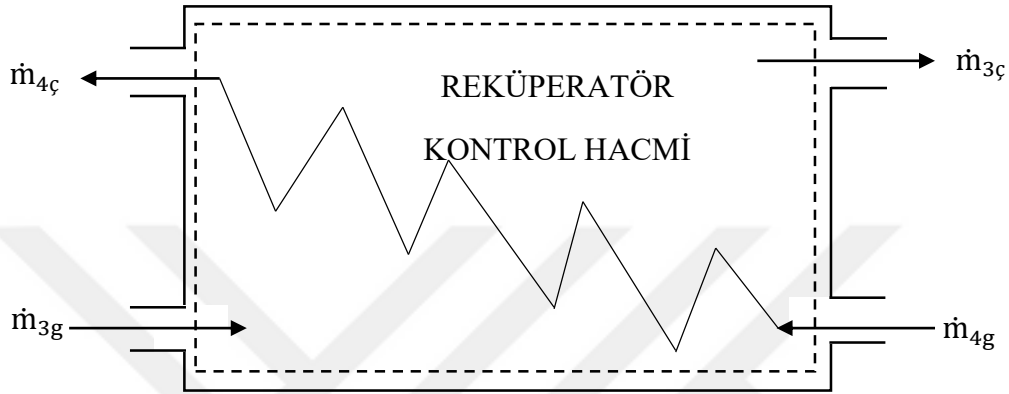


Şekil 10. Isı değiştirici için kontrol hacmi

$$\dot{m}_{g1}h_{g1} + \dot{m}_{g2}h_{g2} = \dot{m}_{\zeta1}h_{\zeta1} + \dot{m}_{\zeta2}h_{\zeta2} \quad (2.68)$$

Isı geçişi esnasında yararlı güç yoktur.

$$\dot{m}_{g1}ex_{g1} + \dot{m}_{g2}ex_{g2} = \dot{m}_{\zeta1}ex_{\zeta1} + \dot{m}_{\zeta2}ex_{\zeta2} + Ex_L \quad (2.69)$$



Şekil 11. Reküperatör için kontrol hacmi

$$\dot{m}_{g3}h_{g3} + \dot{m}_{g4}h_{g4} = \dot{m}_{\zeta3}h_{\zeta3} + \dot{m}_{\zeta4}h_{\zeta4} \quad (2.70)$$

Isı geişi esnasında yararlı gü yoktur.

$$\dot{m}_{g3}ex_{g3} + \dot{m}_{g4}ex_{g4} = \dot{m}_{\zeta3}ex_{\zeta3} + \dot{m}_{\zeta4}ex_{\zeta4} + Ex_L \quad (2.71)$$

2.2.2.7. Tüm Sistemin Ekserji Verimi

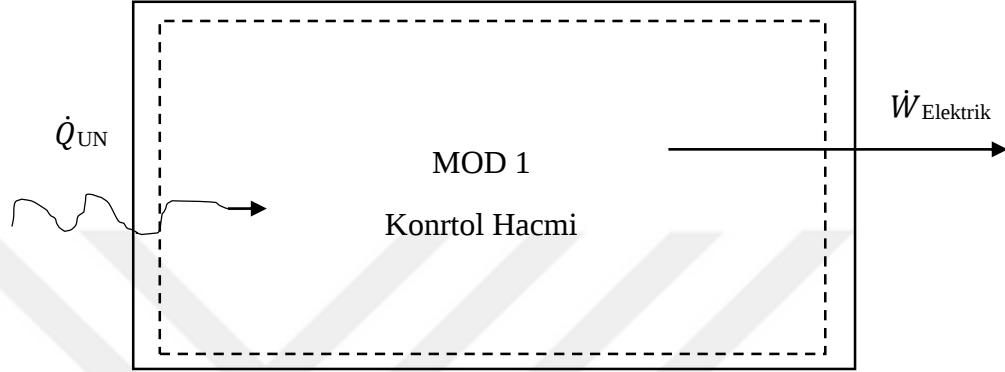
Tüm sistemin enerji verimini hesaplamak için çıkan veya elde edilen elektrik, reaktörde kullanılan yakıtın verdiği ısıya bölünür.

$$\eta = \frac{\dot{E}^w}{\dot{E}^Q} \quad (2.72)$$

Tüm sistemin ekserji verimini hesaplamak için çıkan veya elde edilen elektrik, bu elektriği üretmek için kullanılan yakıtın ekserjisine bölünür.

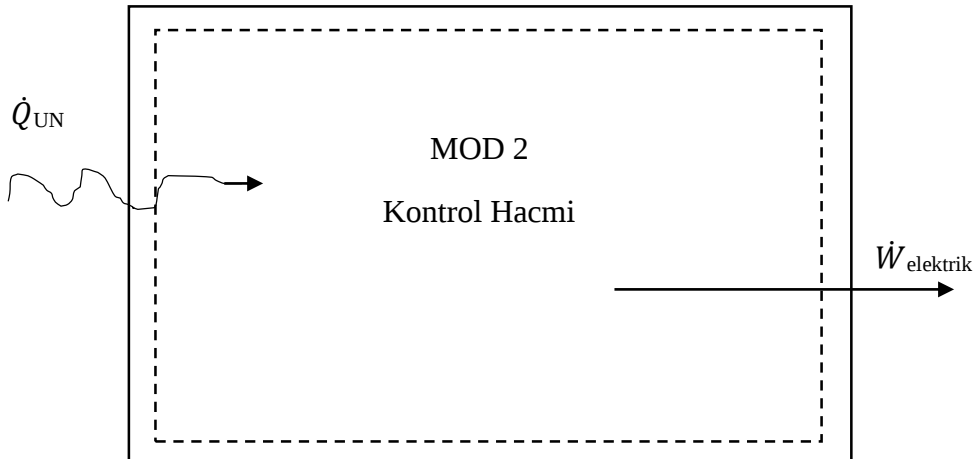
$$\xi_{ex} = \frac{E\dot{x}^w}{E\dot{x}Q} \quad (2.73)$$

η sistemin enerji verimi, $\dot{E}^w$ üretilen elektrik miktarı, ξ_{ex} Sistemin ekserji verimi, $\dot{E}\dot{x}^w$ üretilen elektrik miktarı olarak tanımlamaktadır. Her bir mod için en genel ekserji verimi denklemi denklem 2.73'teki gibidir.



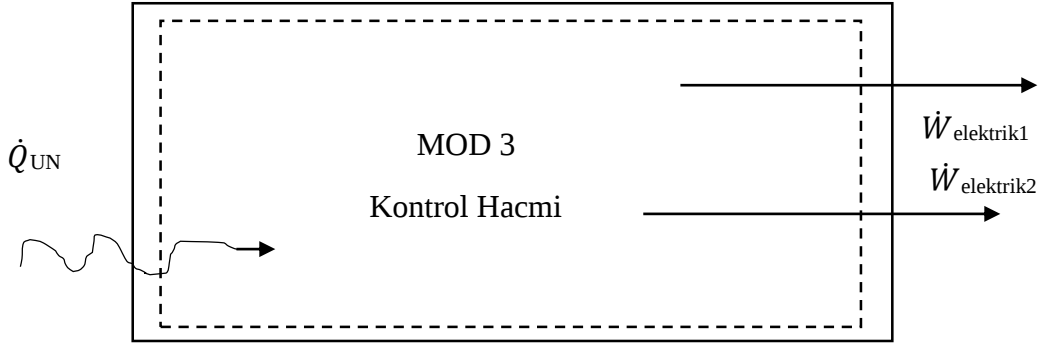
Şekil 12. Birinci modun kontrol hacmi

Birinci modda kontrol hacmine tek giriş reaktörde bulunan yakıttan alınan termal güçtür. Çıkışlar ise bir adet türbin ve iki adet kompresörde dolaşan akışkan sonrası üretilen net elektriktir.



Şekil 13. İkinci modun kontrol hacmi

İkinci modda kontrol hacmine tek giriş reaktörde bulunan yakıttan alınan termal güçtür. Çıkışlar ise bir adet türbin ve bir adet pompa da dolaşan akışkan sonrası üretilen net elektriktir.



Şekil 14. Üçüncü modun kontrol hacmi

Üçüncü modda kontrol hacmine tek giriş reaktörde bulunan yakıttan alınan termal güçtür. Çıkışlar ise iki adet türbin, iki adet kompresör ve bir adet pompadan üretilen net elektriktir.

Tablo 8. Birinci modun kütle ve enerji, ekserji denklemleri

	Kütle Denge Denklemi	Enerji Denge Denklemi	Ekserji Denge Denklemi
Entegre Isı değiştirici	$\dot{m}_1 = \dot{m}_2$ $\dot{m}_3 = \dot{m}_{10}$	$(\dot{m}_1 h_1 + \dot{m}_{10} h_{10})$ $= (\dot{m}_2 h_2 + \dot{m}_3 h_3)$	$\dot{m}_1 ex_1 + \dot{m}_{10} ex_{10} = \dot{m}_2 ex_2 + \dot{m}_3 ex_3 + Ex_L$
Gaz Türbini	$\dot{m}_3 = \dot{m}_4$	$\dot{m}_3 h_3 - \dot{m}_4 h_4 = \dot{W}_t$	$\dot{m}_3 h_3 = \dot{m}_4 h_4 + \dot{W}_t + \dot{Ex}_L$
1.Kompresör	$\dot{m}_6 = \dot{m}_7$	$\dot{m}_6 h_6 - \dot{m}_7 h_7 = \dot{W}_k$	$\dot{m}_6 h_6 + \dot{W}_k = \dot{m}_7 h_7 + \dot{Ex}_L$
2.Kompresör	$\dot{m}_8 = \dot{m}_9$	$\dot{m}_8 h_8 - \dot{m}_9 h_9 = \dot{W}_k$	$\dot{m}_8 h_8 + \dot{W}_k = \dot{m}_9 h_9 + \dot{Ex}_L$
1.Eşanjör	$\dot{m}_5 = \dot{m}_6$ $\dot{m}_{1g} = \dot{m}_{1ç}$	$(\dot{m}_5 h_5 + \dot{m}_{1g} h_{1g})$ $= (\dot{m}_6 h_6 + \dot{m}_{1ç} h_{1ç})$	$\dot{m}_5 ex_5 + \dot{m}_{1g} ex_{1g} = \dot{m}_6 ex_6 + \dot{m}_{1ç} ex_{1ç} + Ex_L$
2. Eşanjör	$\dot{m}_7 = \dot{m}_8$ $\dot{m}_{2g} = \dot{m}_{2ç}$	$(\dot{m}_7 h_7 + \dot{m}_{2g} h_{2g}) =$ $(\dot{m}_8 h_8 + \dot{m}_{2ç} h_{2ç})$	$\dot{m}_7 ex_7 + \dot{m}_{2g} ex_{2g} =$ $\dot{m}_8 ex_8 + \dot{m}_{2ç} ex_{2ç} + Ex_L$
Rekuperatör	$\dot{m}_9 = \dot{m}_{10}$ $\dot{m}_4 = \dot{m}_5$	$(\dot{m}_7 h_7 + \dot{m}_{2g} h_{2g}) =$ $(\dot{m}_8 h_8 + \dot{m}_{2ç} h_{2ç})$	$\dot{m}_9 ex_9 + \dot{m}_4 ex_4 =$ $\dot{m}_{10} ex_{10} + \dot{m}_5 ex_5 + Ex_L$

Tablo 9. İkinci modun kütle ve enerji, ekserji denklemleri

	Kütle Denge Denklemi	Enerji Denge Denklemi	Ekserji Denge Denklemi
Entegre Isı değiştirici	$\dot{m}_1 = \dot{m}_2$ $\dot{m}_4 = \dot{m}_8$	$(\dot{m}_1 h_1 + \dot{m}_4 h_4)$ $= (\dot{m}_2 h_2 + \dot{m}_8 h_8)$	$\dot{m}_{g1} ex_{1g} + \dot{m}_{g2} ex_{2g} =$ $\dot{m}_{\zeta 1} ex_{1\zeta} + \dot{m}_{\zeta 2} ex_{2\zeta} + Ex_L$
Türbin	$\dot{m}_4 = \dot{m}_5$	$\dot{m}_4 h_4 - \dot{m}_5 h_5 = W_t$	$\dot{m}_4 h_4 = \dot{m}_5 h_5 + W_t + \dot{Ex}_L$
Eşanjör	$\dot{m}_5 = \dot{m}_6$ $\dot{m}_{1g} = \dot{m}_{1\zeta}$	$(\dot{m}_5 h_5 + \dot{m}_{1g} h_{1g})$ $= (\dot{m}_6 h_6 + \dot{m}_{1\zeta} h_{1\zeta})$	$\dot{m}_{g1} ex_{1g} + \dot{m}_5 ex_5 =$ $\dot{m}_{\zeta 1} ex_{1\zeta} + \dot{m}_6 ex_6 + Ex_L$
Pompa	$\dot{m}_6 = \dot{m}_7$	$\dot{m}_7 h_7 - \dot{m}_6 h_6 = W_p$	$\dot{m}_6 h_6 + W_p = \dot{m}_7 h_7 + \dot{Ex}_L$
Boru Isı değiştirici	$\dot{m}_7 = \dot{m}_8$ $\dot{m}_2 = \dot{m}_3$	$(\dot{m}_7 h_7 + \dot{m}_2 h_2)$ $= (\dot{m}_8 h_8 + \dot{m}_3 h_3)$	$\dot{m}_7 ex_7 + \dot{m}_2 ex_2 =$ $\dot{m}_8 ex_8 + \dot{m}_3 ex_3 + Ex_L$

Tasarlanan üç farklı moddaki soğutma ve güç üretimi sisteminde kullanılan tüm elemanların kütle, enerji ve ekserji denklemleri verilmiştir. Birinci ve ikinci modun tüm elemanları üçüncü modda da kullanılmıştır. Bu yüzden üçüncü modun kütle, enerji ve ekserji denklemleri yukarıda verilen Tablo 8 ve Tablo 9'daki gibidir.

3. BULGULAR

Bu çalışmada “Bir Modüler Nükleer Reaktörün Farklı Akışkanlarla Soğutulmasının Termodinamik Performansının Araştırılması” konusu incelenmiştir. Çalışmada, ikincil soğutucu akışkan olarak s-CO₂, s-Su ve FLiNaK kullanılan üç farklı soğutma ve güç üretimi modunun enerji ve ekserji analizlerine ait bulgular sunulmuştur.

s-CO₂ ve s-Su soğutucu akışkanlarının kullanıldığı nükleer reaktörlerde ve güneş kulelerinde türbinler, genel olarak 800-870K sıcaklıklarında çalışmaktadır (Johnson vd., 2012). Deneysel çalışmalarda ise bu rakam 1100K’e kadar çıkabilmektedir. Bu çalışmada literatürdeki sıcaklık değerlerine bağlı olarak türbin giriş sıcaklığı s-CO₂ için 883K ve s-Su için 1050 K olarak kabul edilmiştir.

3.1. Mod-1 ile İlgili Bulgular

Birinci modda reaktörün kor bölgesindeki FLiBe, ikincil soğutucu akışkan s-CO₂ ile ısı alış-verişinde bulunmaktadır. Reaktöre entegre ısı değiştiricisinden çıkan s-CO₂, türbinden önce 3 numaralı hatta türbin girişinde 25344 kW enerji ve 13297 kW ekserji değerine sahiptir. Türbin çıkışında 4 numaralı hatta s-CO₂’in enerji değeri 21193 kW ve ekserji değeri 9536 kW olarak hesaplanmıştır. Türbin için kurulan enerji dengesi denklemi ile üretilen elektrik miktarı hesaplanmıştır. Denklem 2.54’ e göre yapılan hesaplamalarda türbinden 3942 kW elektrik üretildiği belirlenmiştir. Türbinde genişleyen s-CO₂’in basıncı ve sıcaklığı düştükten sonra 4 numaralı hat aracılığıyla reküperatöre girer. Reküperatörden çıkarak birinci eşanjöre (5 nolu eşanjör) giden gazın eşanjör öncesi 5 numaralı hatta enerji değeri 9409 kW ve ekserji değeri 5103 kW olarak bulunmuştur. Eşanjöre giren s-CO₂ kompresöre gönderilmeden önce burada bir miktar soğutulur. Birinci eşanjörde (5 nolu eşanjör) soğutma için kullanılan suyun giriş sıcaklığı 298 K, çıkış sıcaklığı 343 K’dir. Soğutma suyunun debisi 13 kg/s olarak hesaplanmıştır. Eşanjör çıkışında 6 numaralı hatta hesaplanan enerji ve ekserji değerleri ise sırasıyla 6452 kW ve 4951 kW iken birinci eşanjörden ısı çıkışı 2513 kW’tır. Birinci eşanjörde (5 nolu eşanjör) soğutulan akışkan alçak basınç kompresörüne girer. Bu kompresörde basınçlandırılan s-CO₂’in kompresör çıkışında 6491 kW enerji ve 5043 kW ekserji değerine sahip olduğu hesaplanmıştır. Yüksek basınç kompresörü (YBK) öncesi tekrar bir eşanjöre (7 nolu

eşanjör) giren s-CO₂ eşanjör çıkışında yani 8 numaralı hatta 6174 kW enerji ve 5033 kW ekserji değerine sahipken ikinci eşanjörden (7 nolu eşanjör) ısı çıkışı 269 kW'tır. 2. eşanjörde soğutma için kullanılan suyun giriş sıcaklığı 298 K, çıkış sıcaklığı 343 K'dir. Soğutma suyunun debisi 1,4 kg/s olarak hesaplanmıştır. Yüksek basınç kompresörü çıkışında yani 9 numaralı hatta ise enerji ve ekserji hesaplamaları sonucu 6454 kW enerji ve 5308 kW ekserji değeri elde edilmiştir. Kullanılan iki kompresörde harcanan elektrikler ise denklem 2.64'e göre ilk kompresör için 39 kW ve ikinci kompresör için 279 kW'tır. Sistemdeki türbin-jeneratörden 3427 kW elektrik üretilirken bu elektriğin 318 kW'lık kısmı sistemde sıkıştırma işlemi için kullanılmıştır. Mod 1 için yapılan hesaplamalara göre yaklaşık 3,43 MW net elektrik üretimi gerçekleşmiştir.

3.2. Mod-2 ile İlgili Bulgular

İkinci modda reaktörün kor bölgesindeki FLiBe, s-Su ile ısı alış-verişinde bulunur. Reaktöre entegre ısı değiştiriciden çıkan s-Su türbin girişindeki 4 numaralı hatta 8874 kW enerji ve 4317 kW ekserji değerine sahiptir. Türbinde genişleme işleminden sonra s-Su'da sıcaklık ve basınç düşüşü gerçekleşir. Türbin çıkışında 5 numaralı hatta s-Su'nun enerji değeri 4774 kW ve ekserji değeri 218 kW olarak hesaplanmıştır. Türbin için kurulan enerji dengesi denklemi ile üretilen elektrik miktarı hesaplanmıştır. Buna göre denklem 2.59 kullanılarak türbinden 3310 kW elektrik üretildiği bulunmuştur. Türbin kanatlarında basıncı ve sıcaklığı düşen akışkan eşanjöre (4 nolu eşanjör) girer. Yapılan hesaplamalara göre eşanjörden ısı çıkışı ise 4477 kW'tır. Eşanjörde (4 nolu eşanjör) soğutma için kullanılan suyun giriş sıcaklığı 298 K, çıkış sıcaklığı 343 K'dir. Soğutma suyunun debisi 23 kg/s'dir. Eşanjörden çıkarak pompaya gelen akışkan burada istenilen mertebeye basınçlandırılır. Bu basınçlandırma işlemi sırasında pompa bir miktar enerji sarfiyatında bulunur. Pompa sonrası ise yani 7 numaralı hatta 350 kW enerji ve 56 kW ekserji değeri olduğu bulunmuştur. Denklem 2.68 kullanılarak yapılan hesaplamalara göre suyun basınçlandırılması için kullanılan eleman olan pompanın harcadığı güç 63 kW'tır. FLiBe tuzunu reaktöre girmeden tekrar soğutmak için tuzun aktığı borudaki ısı değiştiricisine giren su burada FLiBe tuzunu soğutur. Tuzun soğuması ile birlikte su ısınır. İkinci ısı değiştiricinin çıkışında ise 1179 kW enerji ve 175 kW ekserji değeri bulunmuştur. Mod 2 için yapılan hesaplamalara göre yaklaşık 3,25 MW net elektrik üretimi gerçekleşmiştir.

3.3. Mod-3 ile İlgili Bulgular

Üçüncü modda kor bölgesindeki FLiBe, önce s-CO₂ ile s-CO₂'nin devre dışı bırakılması durumunda FLiNaK ile ve sonrasında s-Su ile ısı alış-verişinde bulunur. Reaktöre entegre ilk ısı değiştiriciden çıkan s-CO₂ türbin girişinde 3 numaralı hatta 14213 kW enerji ve 7457 kW ekserji değerine sahiptir. Türbin çıkışında 5 numaralı hatta s-CO₂'in enerji değeri 11885 kW ve ekserji değeri 5348 kW olarak hesaplanmıştır. Türbin için kurulan enerji dengesi denklemi ile üretilen elektrik miktarları hesaplanmıştır. Denklem 2.54'e göre yapılan hesaplamalarda türbinden 2211 kW elektrik üretilmektedir. Türbinde genişleyen s-CO₂'in basıncı ve sıcaklığı düşerek 5 numaralı hat aracılığıyla reküperatöre girer. Reküperatörden çıkarak birinci eşanjöre (5 nolu eşanjör) giden gazın eşanjör öncesi 6 numaralı hatta enerji değeri 4784 kW ve ekserji değeri 2828 kW olarak bulunmuştur. Eşanjöre (5 nolu eşanjör) giren s-CO₂ kompresöre gönderilmeden önce burada bir miktar soğutulur. Birinci eşanjörde (5 nolu eşanjör) soğutma için kullanılan suyun giriş sıcaklığı 298 K, çıkış sıcaklığı 343 K'dir. Soğutma suyunun debisi 5 kg/s'dir. Eşanjör çıkışında 7 numaralı hatta hesaplanan enerji ve ekserji değerleri ise sırasıyla 3618 kW ve 2776 kW iken birinci eşanjörden ısı çıkışı 990 kW'tır. Birinci eşanjörde (5 nolu eşanjör) soğutulan akışkan alçak basınç kompresörüne (ABK) girer. Bu kompresörde sıkıştırılarak basınçlandırılan s-CO₂'in kompresör çıkışında 3640 kW enerji ve 2828 kW ekserji değerine sahip olduğu hesaplanmıştır. Yüksek basınç kompresörü (YBK) öncesi tekrar bir eşanjöre giren s-CO₂ eşanjör çıkışında yani 9 numaralı hatta 3462 kW enerji ve 2823 kW ekserji değerine sahipken ikinci eşanjörden (7 nolu eşanjör) ısı çıkışı 151 kW'tır. İkinci eşanjörde soğutma için kullanılan suyun giriş sıcaklığı 298 K, çıkış sıcaklığı 343 K'dir. Soğutma suyunun debisi 0,8 kg/s'dir. Yüksek basınç kompresörü çıkışında yani 10 numaralı hatta ise enerji ve ekserji hesaplamaları sonucu 3619 kW enerji ve 2977 kW ekserji değeri elde edilmiştir. Kullanılan iki kompresörde sarf edilen elektrikler ise denklem 2.64'e göre ilk kompresör için 21 kW ve ikinci kompresör için 156 kW'tır. Sistemdeki türbin-jeneratörden 2100 kW elektrik üretilirken bu elektriğin 177 kW'lık kısmı sıkıştırma işlemi için kullanılmıştır. FLiNaK'ın devre dışı olduğu durumda Mod 3'ün s-CO₂ hattında yapılan hesaplamalara göre yaklaşık 1,92 MW net elektrik üretimi gerçekleşmiştir.

s-CO₂'nin devre dışı kalması durumunda devreye giren FLiNaK, FLiBe ile ısı alış verişinde bulunur. Reaktöre entegre ısı değiştiriciden çıkan FLiNaK ara ısı değiştiricide s-CO₂ ile ısı alışverişi yaparak tekrar reaktöre entegre ısı değiştiricisine döner. Reaktöre entegre ilk ısı değiştiriciden çıkan s-CO₂ türbin girişinde 3 numaralı hatta 13502 kW enerji ve 7084 kW ekserji değerine sahiptir. Türbin çıkışında 5 numaralı hatta s-CO₂'in enerji değeri 11291 kW ve ekserji değeri 5081 kW olarak hesaplanmıştır. Türbin için kurulan enerji dengesi denklemi ile üretilen elektrik miktarları hesaplanmıştır. Denklem 2.54'e göre yapılan hesaplamalarda türbinden 2100 kW elektrik üretilmektedir. Türbinde genişleyen s-CO₂'in basıncı ve sıcaklığı düşerek 5 numaralı hat aracılığıyla reküperatöre girer. Reküperatörden çıkarak birinci eşanjöre (5 nolu eşanjör) giden gazın eşanjör öncesi 6 numaralı hatta enerji değeri 4545 kW ve ekserji değeri 2685 kW olarak bulunmuştur. Eşanjöre (5 nolu eşanjör) giren s-CO₂ kompresöre gönderilmeden önce burada bir miktar soğutulur. Birinci eşanjörde (5 nolu eşanjör) soğutma için kullanılan suyun giriş sıcaklığı 298 K, çıkış sıcaklığı 343 K'dir. Soğutma suyunun debisi 5 kg/s'dir. Eşanjör çıkışında 7 numaralı hatta hesaplanan enerji ve ekserji değerleri ise sırasıyla 3437 kW ve 2635 kW iken birinci eşanjörden ısı çıkışı 941 kW'tır. Birinci eşanjörde (5 nolu eşanjör) soğutulan akışkan alçak basınç kompresörüne (ABK) girer. Bu kompresörde sıkıştırılarak basınçlandırılan s-CO₂'in kompresör çıkışında 3458 kW enerji ve 2684 kW ekserji değerine sahip olduğu hesaplanmıştır. Yüksek basınç kompresörü (YBK) öncesi tekrar bir eşanjöre giren s-CO₂ eşanjör çıkışında yani 9 numaralı hatta 3289 kW enerji ve 2679 kW ekserji değerine sahipken ikinci eşanjörden (7 nolu eşanjör) ısı çıkışı 143 kW'tır. İkinci eşanjörde soğutma için kullanılan suyun giriş sıcaklığı 298 K, çıkış sıcaklığı 343 K'dir. Soğutma suyunun debisi 0,7 kg/s'dir. Yüksek basınç kompresörü çıkışında yani 10 numaralı hatta ise enerji ve ekserji hesaplamaları sonucu 3438 kW enerji ve 2825 kW ekserji değeri elde edilmiştir. Kullanılan iki kompresörde sarf edilen elektrikler ise denklem 2.64'e göre ilk kompresör için 20 kW ve ikinci kompresör için 148 kW'tır. Sistemdeki türbin-jeneratörden 1995 kW elektrik üretilirken bu elektriğin 168 kW'lık kısmı sıkıştırma işlemi için kullanılmıştır. FLiNaK devrede olduğunda Mod 3'ün s-CO₂ hattında yapılan hesaplamalara göre yaklaşık 1,8 MW net elektrik üretimi gerçekleşmiştir.

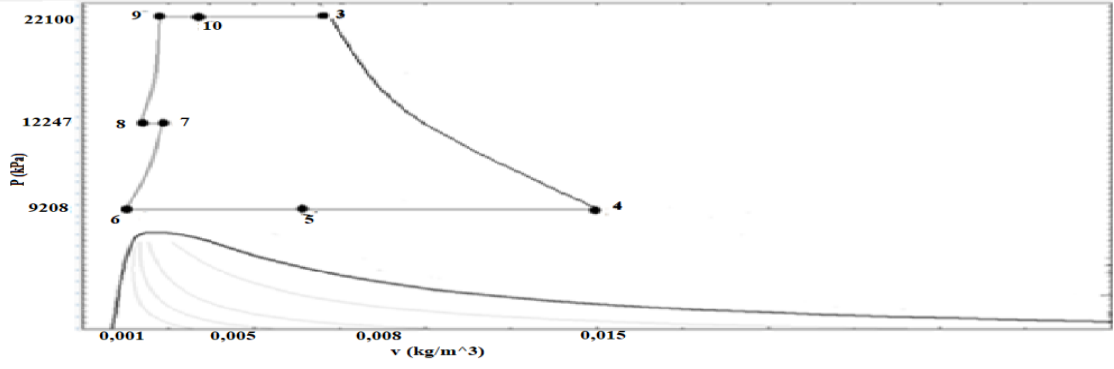
İlk kısımda biraz soğutulan FLiBe sonrasında s-Su ile ısı alış verişinde bulunur. Reaktöre entegre ısı değiştiriciden çıkan s-Su türbin girişinde 4 numaralı hatta 5106 kW

enerji ve 2484 kW ekserji değerine sahiptir. Türbinde genişleme işleminden sonra s-Su'da sıcaklık ve basınç düşüşü gerçekleşir. Türbin çıkışında 5 numaralı hatta s-Su'nun enerji değeri 2747 kW ve ekserji değeri 125 kW olarak hesaplanmıştır. Türbin için kurulan enerji dengesi denklemi ile üretilen elektrik miktarı hesaplanmıştır. Buna göre denklem 2.59 kullanılarak türbinden 1904 kW elektrik üretildiği hesaplanmıştır. Türbin kanatlarında basıncı ve sıcaklığı düşen akışkan eşanjöre (4 numaralı eşanjör) girer. Eşanjör sonrası ise yapılan hesaplamalarda 6 numaralı hatta 171 kW enerji ve 0,297 kW ekserji değeri olduğu hesaplanmıştır. Eşanjörde soğutma için kullanılan suyun giriş sıcaklığı 298 K, çıkış sıcaklığı 343 K'dir. Soğutma suyunun debisi 14 kg/s'dir. Eşanjörden çıkarak pompaya gelen akışkan burada reaktöre entegre ısı değiştirici giriş basıncına basınçlandırılır. Bu basınçlandırma işlemi sırasında pompa bir miktar enerji sarfiyatında bulunur. Pompa öncesi 6 numaralı hattaki enerji ve ekserji değerleri yukarıda verilmiştir. Pompa sonrası ise yani 7 numaralı hatta 201 kW enerji ve 32 kW ekserji değeri olduğu bulunmuştur. Denklem 2.70 kullanılarak yapılan hesaplamalara göre pompanın harcadığı güç 36 kW'tır. FLiBe tuzunu reaktöre girmeden tekrar soğutmak için tuzun aktığı borudaki ısı değiştiricisine (Şekil 2 / 6 numara) giren su burada FLiBe tuzunu soğutur. Tuzun soğuması ile birlikte su bir miktar ısınır. İkinci ısı değiştiricinin çıkışındaki boruda 1258,7 kW enerji ve 293,4 kW ekserji değeri bulunmuştur. Mod 3'ün s-Su hattında yapılan hesaplamalara göre yaklaşık 1,8 MW net elektrik üretimi gerçekleşmiştir.

3.4. Modların Karşılaştırılması

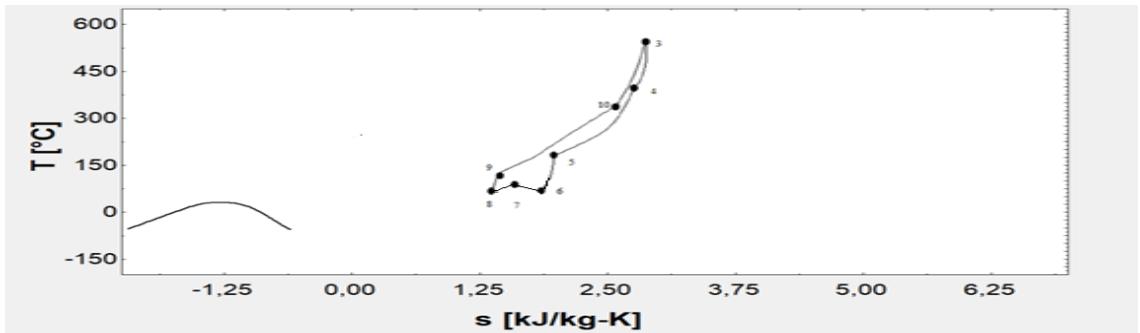
s-CO₂-s-Su ikili soğutma sisteminde toplamda 3,79 MW elektrik üretilirken s-CO₂'nin devre dışı kalması durumunda FLiNaK-s-Su ikili soğutma sisteminde 3,69 MW elektrik üretilmektedir. Reaktörün kor bölgesinde ise FLiBe erimiş tuzuna bağlı olarak yapılan hesaplamalarda 8100 kW güç olduğu hesaplanmıştır.

Her bir modda dolaşan soğutucu akışkanların P-v ve T-s diyagramları aşağıda verilmiştir.



Şekil 15. Birinci moddaki soğutucu akışkan s-CO₂ için P-v diyagramı

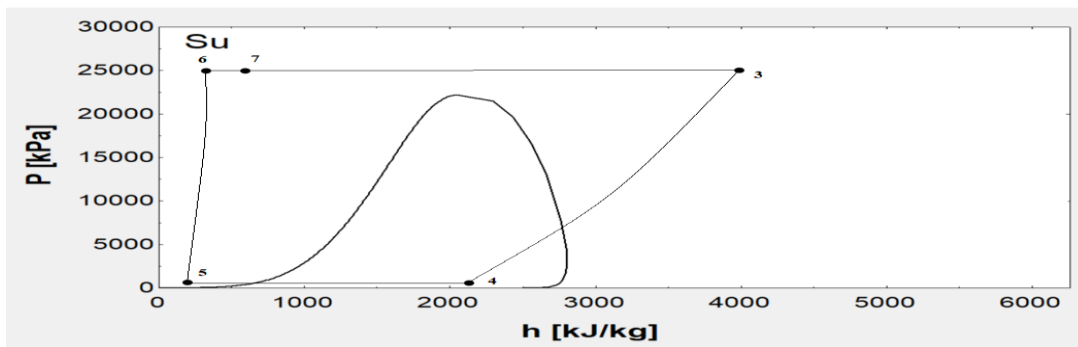
Şekil 15 birinci moddaki soğutucu akışkan s-CO₂ için P-v diyagramını göstermektedir. Reaktöre entegre ısı değiştiricisinde (10) (Şekil 15 / 9, 10 nolu noktalar) ısınan akışkanın basıncı 22,1 MPa'da sabit kalarak genişler ve türbine (3) (Şekil 15 / 3 numaralı nokta) girer. Türbinde (3) enerji üretimi gerçekleştirilirken akışkan burada enerjisini bir miktar kaybeder basıncında 9,2 MPa'a düşüş olurken hacminde 0,008 kg/m³'ten 0,015 kg/m³'e genişleme olur. Şekil 15'te 4 ve 6 numaralı noktalar arasında akışkan önce reküperatöre (4) daha sonrasında birinci eşanjöre (5) girer. Bu elemanlar akışkanın basıncına etki etmez yani 9,2 MPa basınç sabit kalırken hacim 0,015 kg/m³'ten 0,001 kg/m³'e kadar düşer. Şekil 15 / 6 numaralı noktada alçak basınç kompresörüne (6) giren akışkan 12,2 MPa'ya basınçlandırılır ve ısınır. Bunun sonucunda hacminde bir genişleme olur. İkinci kompresör öncesi tekrar bir eşanjöre (7) giren akışkan burada yüksek basınç kompresör giriş sıcaklığına (8) kadar soğutulur. Burada gerçekleştirilen soğutma işlemi sonucunda hacimde tekrar bir küçülme meydana gelir. Kompresör çıkışında ise basınçlandırılan akışkan reküperatöre girerek (9) burada reaktör kabı giriş sıcaklığına (10) yükseltilir ve 22,1 MPa basınç 0,005 kg/m³ hacme ulaşarak çevrimi tamamlamış olur. s-CO₂'in dolaştığı çevrimlerde CO₂ her zaman kritik noktanın üzerindedir. Bir başka deyişle çevrim boyunca hep süperkritik fazdadır.



Şekil 16. Birinci moddaki soğutucu akışkan s-CO₂ için T-s diyagramı

Şekil 16 / 3 numaralı noktada 883 K sıcaklığında ve 22,1 MPa basıncında olan akışkan burada türbine girer. Türbinde enerji kaybeden akışkanın sıcaklığında ve entropisinde düşüş meydana gelir. Şekil 16 / 4 numaralı noktada basınç 9,2 MPa ve sıcaklık 725 K olurken entropi 2,8076 kJ/kgK'den 2,7504 kJ/kgK'e düşer. Şekil 16 / 4 numaralı noktada reküperatöre giren akışkan burada yüksek basınç kompresöründen (9) gelen akışkanla ısı alışverişi yapar ve sıcaklığı 725 K'den 324 K'e düşer. Sıcaklığın düşmesine bağlı olarak entropi de 1,6719 kJ/kgK'e düşer. Şekil 16 / 5 numaralı noktada reküperatörden (4) çıkan akışkan kompresör giriş sıcaklığına kadar soğutulur. Şekil 16 / 4-6 numaralı noktalar arasında soğutulan akışkanın entropisinde de 1,2605 kJ/kgK'e düşüş meydana gelir. Sonrasında alçak basınç kompresörüne giren akışkan burada sıkıştırılır. Basıncın artmasına bağlı olarak sıcaklık artar ancak entropide 1,2527 kJ/kgK'e kadar bir düşüş meydana gelir. Daha sonra yüksek basınç kompresörüne (8) girecek olan akışkan Şekil 16 / 8 numaralı noktaya kadar tekrar soğutulur. Son olarak Şekil 16 / 9 numaralı noktada yani kompresör çıkışında 22,1 MPa'ya basınçlandırılan akışkan reküperatöre (4) girerek basınç değişimi olmadan ısıtılarak reaktör kabı (10) giriş sıcaklığına yükseltilir ve entropisi 2,3527 kJ/kgK olur.

Şekil 16 birinci moddaki soğutucu akışkan s-CO₂ için T-s diyagramı göstermektedir. Diyagramdan da görüldüğü gibi süperkritik fazdaki CO₂ tüm soğutma ve güç üretimi sistemi boyunca kritik noktanın üzerindedir.

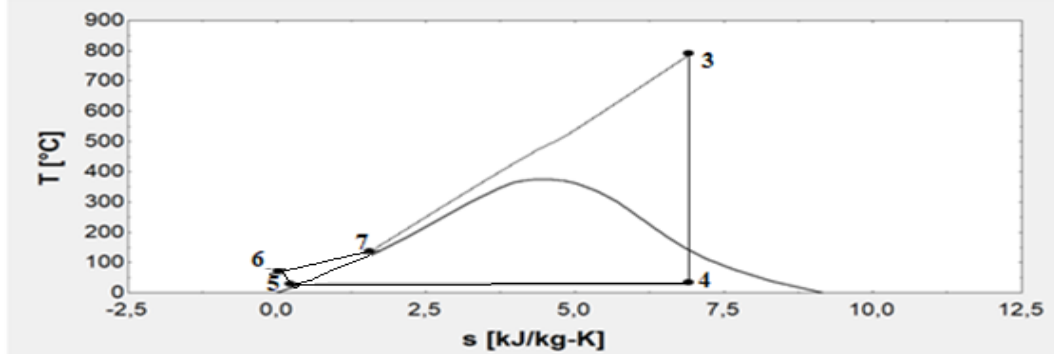


Şekil 17. İkinci moddaki s-Su için P-h diyagramı

Şekil 17 ikinci moddaki soğutucu akışkan s-Su için P-h diyagramını göstermektedir. Reaktöre entegre ısı değiştiricisinde (8) (Şekil 17 / 6-7) ısınan akışkanın basıncı sabit kalarak genişler ve türbine (3) girer. Türbinde enerji üretimi gerçekleştirilirken akışkan burada enerjisini bir miktar kaybeder. 25 MPa basıncında ve

1050 K sıcaklığında türbine giren akışkanın entalpisi 3982,4 kJ/kg'dır. Akışkanın türbin (3) sonrası sıcaklık ve basınç değerlerinde düşüş olur ve akışkan buhar fazına geçer. Şekil 17 / 4 numaralı noktada entalpi 2142,8 kJ/kg olur. Şekil 17 / 5 numaralı noktada akışkan pompaya gireceğinden tam olarak sıvı faza geçmesi gerekir. Bundan dolayı 4-5 numaralı noktalar arasında buhar bir kondenserden (4) geçirilerek soğutularak 7,5 kPa basınç ve 305 K sıcaklığına getirilir. Burada akışkanın entalpisi 133,47 kJ/kg olur. Kondenser (4) akışkanın basıncına etki etmezken hacminde ise daralmaya neden olur. Şekil 17 / 5 numarada pompaya (5) giren akışkan 25 MPa'ya basınçlandırılır ve entalpisi 157,19 kJ/kg'a gelir. Sonrasında akışkan boru ısı değiştiriciye (6) gönderilir. Boru ısı değiştiricide (6) ısınan akışkan reaktör kabı giriş sıcaklığına kadar ısıtılır ve bunun sonucunda 157,19 kJ/kg'dan, 529,16 kJ/kg'a entalpisinde bir artış meydana gelir ve döngü tamamlanmış olur.

Şekil 17 için anlatılan hal değişimleri bir başka açıdan incelemek için sıcaklık-entropi değişimleri de şekil 18' de verilmiştir.



Şekil 18. İkinci moddaki s-Su için T-s diyagramı

Şekil 18 / 3 numaralı noktada türbine giren akışkan enerji kaybederek bir miktar soğur. Buhar türbinlerinde giriş entropisi çıkış entropisine eşittir. Yani Şekil 18 / 3, 4 numaralı noktalarda entropi değeri 6,8744 kJ/kgK'dir. Süperkritik fazdaki (Şekil 18 / 3) akışkan türbin çıkışında buhar fazına geçer. Şekil 18 / 5 numaralı noktada pompaya (5) girecek olan akışkan bir kondenser vasıtasıyla (Şekil 18 / 4, 5) soğutulur. Bu soğutma sonucunda akışkanın entropisi 0,46218 kJ/kgK olur. Daha sonra pompa (5) ile bir giriş basıncına kadar basınçlandırılan akışkanın entropisi (6) 0,45804 kJ/kgK'e düşer. Pompa ile önce boru ısı değiştiriciye (7) gönderilen akışkan burada ısınarak reaktör kabı (8) giriş

sıcaklığına getirilir ve entropisi 1,5259 kJ/kgK olur. Şekil 18 / 5,6 ve 7 numaralı noktalarda sıvı halde olan akışkan reaktör kabına girdikten sonra (Şekil 18 / 7-3) noktaları arasında süperkritik faza geçer ve entropisinde de bir artış olur.

Üçüncü moddaki giriş, çıkış sıcaklıkları ilk iki moda göre ayarlanmıştır. Bundan dolayı P-v ve T-s diyagramları şekil 15, 16, 17, 18’de ki gibidir.

Tablo 10. Sistem verimi

Mod	Enerji Verimi (%)	Ekserji Verimi (%)
Birinci mod	42,3	54,9
İkinci mod	40,1	52
Üçüncü mod (s-CO ₂)	46,8	60,7
Üçüncü mod (FLiNaK)	45,6	59,18

Tez çalışmasında termodinamik analizi yapılan üç modun enerji ve ekserji verimi Tablo 10’ da verilmiştir.

Tablo 11. Üretilen elektrik miktarları

MOD	Üretilen Elektrik (kW)
Birinci Mod	3427
İkinci Mod	3247
Üçüncü mod (s-CO ₂)	3790
Üçüncü mod (FLiNaK)	3694

Tez çalışmasında termodinamik analizi yapılan üç moddan elde edilen elektrik miktarları Tablo 11’ de verilmiştir.

Tablo 12. Sistemdeki bileşenlerin ısı/iş üretimi/sarfiyatı

Modlar	Bileşenler	Isı (kW)	İş (kW)	
			Üretilen	Harcanan
MOD 1	Reaktör Kabı	8100	-	-
	Entegre Isı Değişt.	7695	-	-
	Gaz Türbini	-	3942	-
	1.Eşanjör	2513	-	-
	Kompresör (ABK)	-	-	39
	2.Eşanjör	270	-	-
	Kompresör (YBK)	-	-	279
MOD 2	Reaktör Kabı	8100	-	-
	Entegre Isı Değişt.	7695	-	-
	Buhar Türbini	-	3310	-
	Eşanjör	4477	-	-
	Pompa	-	-	63
MOD 3	Reaktör Kabı	8100	-	-
	Entegre Isı Değişt.	7695	-	-
	Gaz Türbini	-	2211	-
	s-CO2 Devrede Olunca	1.Eşanjör	990	-
	Kompresör (ABK)	-	-	22
	2.Eşanjör	152	-	-
	Kompresör (YBK)	-	-	156
	Gaz Türbini	-	2100	-
	FLiNaK Devrede Olunca	1.Eşanjör	941	-
	Kompresör (ABK)	-	-	21
	2.Eşanjör	144	-	-
	Kompresör (YBK)	-	-	149
	Buhar Türbini	-	1904	-
	s-Su	Eşanjör	2576	-
	Pompa	-	-	36

4. TARTIŞMA ve SONUÇLAR

Bu çalışmada bir modüler nükleer reaktörün üç farklı soğutma ve güç üretimi modu için ayrı ayrı enerji ve ekserji analizi yapılmıştır. Bu analizin yapılmasındaki temel amaç, farklı soğutucu türleriyle reaktörün soğutulmasının ve elektrik üretiminin incelenmesidir.

Elektrik üretiminin inceleneceği üç farklı soğutma modu tasarlanmıştır. Tasarlanan modlarda reaktörün kor bölgesinin soğutulması işleminde FLiBe erimiş tuzu kullanılmıştır. FLiBe tuzunu soğutmak için reaktöre entegre edilen ısı değiştiricisinde ikincil soğutucu akışkan olarak s-CO₂, s-Su ve FLiNaK kullanılmıştır.

Her bir modda, ilk olarak her bir reaktörün soğutulmasını sağlayacak şekilde türbin giriş sıcaklığına bağlı olarak debi değerleri belirlenmiştir. Sonrasında sistemde akışkanın dolaşması sonucu sarf edilen ve üretilen elektrik miktarları seçilen işletme koşullarına bağlı olarak belirlenerek net elektrik çıktısı hesaplanmıştır. Yapılan hesaplamalar neticesinde, iki modun bir arada kullanıldığı üçüncü modda 3,79 MW ile en fazla net elektrik üretimi gerçekleştirilmiştir. Üçüncü modda FLiNaK kullanılması durumunda elektrik üretimi 3,69 MW'tır. Üçüncü moddan sonra en fazla elektrik üretimi birinci modda gerçekleşmiştir. Birinci modda 3,43 MW net elektrik üretimi gerçekleşmiştir. En az elektrik üretimi ise ikinci modda olmuştur. İkinci modda üretilen elektrik miktarı 3,25 MW'dir.

4.1. Mod 1 ile İlgili Tartışma ve Sonuçlar

s-CO₂'in dolaştığı çevrimlerde CO₂ her zaman kritik noktanın üzerindedir. Bir başka deyişle çevrim boyunca hep süperkritik fazdadır. Süperkritik fazdaki CO₂'in dolaştığı tüm modlarda türbin giriş sıcaklığı ile başlayıp tekrar reaktöre entegre ısı değiştiricisine dönene kadar sıcaklık ve basınçlar eşit olduğundan P-v ve T-s grafikleri Şekil 15 ve Şekil 16'da görüldüğü gibidir. Literatürde yapılan bir çalışmada, reaktör kabında bulunan sıcak erimiş tuz, Brayton çevrimi üzerinden güç üreten ikincil soğutucu akışkan helyum soğutucu sıvısı ile kullanıldığı belirlenmiştir. Bu sistemde kullanılan çevrimdeki ısı verimleri 750 °C'de %48 ve 1000 °C'de %59 şeklinde hesaplanmıştır

(Peterson, 2003). Bu tez çalışması kapsamında yapılan hesaplamalarda 22,1 MPa basınç ve 610 °C sıcaklıkta s-CO₂ iş akışkanı kullanılan türbin işletme koşullarında (Brayton çevriminde) birinci modun enerji verimi %42,3, ekserji verimi %54,9 olarak hesaplanmıştır. s-Su kullanılan ikinci modun enerji verimi %40,1 ve ekserji verimi %52'dir. Üçüncü modda s-CO₂ için enerji verimi %46,8 ve ekserji verimi %60,7'dir. FLiNaK kullanıldığı durumda ise enerji verimi %45,6 ve ekserji verimi %59,18'dir. Enerji verimleri karşılaştırıldığında en yüksek enerji veriminin üçüncü modda olduğu görülmüştür. En düşük verim ise ikinci modda elde edilmiştir.

Literatürdeki kıyaslamaların yapıldığı nükleer reaktörler, gaz soğutmalı, su soğutmalı, kurşun soğutmalı, kurşun bizmut ötektik soğutmalı ve süperkritik akışkan soğutmalı reaktörlerdir. FLiBe erimiş tuz reaktörlerinin enerji, ekserji analizlerinin yapıldığı herhangi bir termodinamik çalışmaya rastlanmamıştır. Bundan dolayı yapılan bu çalışmadaki veriler farklı tür soğutucuların kullanıldığı farklı tip nükleer reaktörlerin verileriyle kıyaslanmıştır. Literatürdeki Terzi vd. (2016), Kong vd. (2018), Rosen vd. (1986), Ünsal (2010), Granovskii (2007), Kong vd., (2018), Duffey vd., (2005), Pham vd., (2015) tarafından üretilen makaleler incelendiğinde nükleer reaktörlerin elektriksel veriminin % 25,7-51 arasında değiştiği görülmektedir. Bu değerler dikkate alındığında, tez çalışması kapsamında yapılan kabuller altında gerçekleştirilen hesaplamalar, verim sonuçlarının termodinamik bakımdan literatürde sunulan değerlerle uyumlu olduğu belirlenmiştir.

4.2. Mod 2 ile İlgili Tartışma ve Sonuçlar

Mod 2'de su, reaktöre entegre ısı değiştiricisinden süperkritik fazda çıkar. Buhar türbinine süperkritik fazda girer ve burada türbin kanatlarının etkisiyle enerjisinde düşüş olur. Türbinden buhar olarak çıkar. Pompaya girmeden tam olarak sıvı hale getirilmesi gereken akışkan eşanjör vasıtasıyla istenilen faza getirilir. Sıvı hale gelen su pompa yardımıyla FLiBe'nin aktığı boru ısı değiştiricisine gider. Burada ısınarak reaktöre girer. Böylece çevrim tamamlanmış olur. İkinci modda ve üçüncü modda sistemde dolaşan s-Su için akışkanın P-h ve T-s diyagramları ise Şekil 17 ve Şekil 18' de verilmiştir. s-Su için diyagramlar incelendiğinde sıvı fazda reaktöre giren akışkan ısınarak en yüksek sıcaklık ve basınca ulaşır. 1. noktada yani türbine girişte süperkritik fazda olan akışkan

türbin sonrası enerji kaybederek Şekil 18’ de görüldüğü gibi buhar fazına geçer. Sistemde çevrim pompa ile tamamlanacağından buhar, eşanjör ile sıvı faza getirilmiştir. Pompa ile basınçlandırılan akışkan ısıtılarak tekrar süperkritik faza getirilmiştir.

s-CO₂ gaz olduğundan kompresörler yardımıyla sistemi tamamen süperkritik fazda dolaşabilmektedir. Buna karşın s-Su, pompa yardımıyla sistem boyunca çevrimi tamamlayacağından sıvı hale getirilmelidir.

4.3. Mod 3 ile İlgili Tartışma ve Sonuçlar

Faz değişimleri de dikkate alınarak, basınç ve sıcaklıklara bağlı olarak entalpi, entropi değerleri sonucu türbinlerde en fazla elektrik üretimleri s-CO₂’nin dolaştığı sistemlerde olduğu görülmüştür. S-Su olan modda ise debi ile sıcaklık ve basınca bağlı olan entalpi, entropi değerleri sonucu daha az elektrik üretildiği görülmüştür. Üretilen elektrik miktarları kW cinsinden Tablo 11’de verilmiştir.

Birinci modda 3427 kW, ikinci modda 3247 kW, üçüncü modda s-CO₂ kullanıldığında 3790 kW ve FLiNaK kullanıldığında 3694 kW elektrik üretilmiştir. En yüksek elektrik üretimi beklenildiği gibi üç soğutucu akışkanın bir arada kullanıldığı üçüncü modda gerçekleşmiştir.

Üçüncü modun termodinamik tasarım bakımından yeni ve termodinamik performans bakımından yüksek olmasına rağmen imalat ve işletim güvenliği bakımından bir takım teknolojik zorlukları mahsurları gibi dezavantajlarının olabileceği düşünülmektedir. Malzeme, imalat ve işletim bakımından ortaya çıkabilecek dezavantajların ayrı bir çalışma olarak belirlenmesi endüstriyel anlamda önem arz etmektedir.

5. ÖNERİLER

- Enerji ve ekserji analizi yapılan sistemin ekserjetik sürdürülebilirlik analizleri ve eksergoekonomik analizleri yapılarak sistemlerin karşılaştırması yapılabilir.
- Reaktör bölgesinde farklı akışkanlar kullanılarak enerji ve ekserji hesaplamaları gerçekleştirilerek karşılaştırmalar yapılabilir.
- Üçüncü mod tasarım bakımından yeni ve performans bakımından yüksek olmasına rağmen imalat ve işletim güvenliği bakımından ayrı bir çalışma kapsamında değerlendirilmelidir.

KAYNAKLAR

- Akbulut, U., Midilli, A., 2017.** A Basic Thermodynamic Design of a Planar SOFC Integrated S-CO₂ Micro-Gas Turbine for Residential Applications, 9th International Exergy, Energy and Environment Symposium, Croatia.
- Alam, F., Sarkar, R., Chowdhury, H., 2019.** Nuclear Power Plants In Emerging Economies And Human Resource Development: A Review, Energy Procedia, Volume 160, Pages 3-10.
- Al-Zareer, M., Dincer, I., Rosen, M.A., 2017.** Development And Assessment Of A Novel Integrated Nuclear Plant For Electricity And Hydrogen Production, Energy Conversion and Management, Volume 134, Pages 221-234.
- Billig, E., Decker, M., Benzinger, W., Ketelsen, F., Pfeifer, P., Peters, R., Stoltena, D., Thräna, D., 2019.** Non-Fossil Co₂ Recycling—The Technical Potential For The Present And Future Utilization For Fuels In Germany, Journal Of Co₂ Utilization, Pages 130-141.
- Black, G.A., Aydogan, F., Koerner, C.L., 2019.** Economic Viability Of Light Water Small Modular Nuclear Reactors: General Methodology And Vendor Data, Renewable And Sustainable Energy Reviews, Volume 103, Pages 248-258.
- Bodansky, D., 2005.** Nuclear Energy Principles, Practices, And Prospects Second Edition.
- Boldon, L., Sabharwall, P., Liu, L., 2015.** Exergy Analysis For Modular Reactor Hybrid Energy System, ASME 2015 Nuclear Forum.
- Boldon, L., Sabharwall, P., Rabiti, C., Bragg-Sitton, S.M., Liu, L., 2016.** Thermodynamic Exergy Analysis For Small Modular Reactor In Nuclear Hybrid Energy System, EPJ Nuclear Sci. Technol. 2, 23.
- Caretto, L., 2009.** Homework Solutions, College of Engineering and Computer Science Mechanical Engineering Department, Alternative Energy.
- Castro, L., Delgado, G., García, C., Dominguez, D.S., 2019** Thermal Analysis Of Ceramic Nuclear Fuels For The Hplwr, Annals Of Nuclear Energy, Volume 127, Pages 227-236
- Chen, Y., 2011.** Thermodynamic Cycles using Carbon Dioxide as Working Fluid CO₂ transcritical power cycle study, School of Industrial Engineering and Management Department of Energy Technology Division of Applied Thermodynamics and Refrigeration.
- Chiari, L., Zecca, A., 2011.** Constraints Of Fossil Fuels Depletion On Global Warming Projections, Energy Policy, Volume 39, Issue 9, Pages 5026-5034.
- Compton, M., Rezaie, B., 2018.** Investigating steam turbine feasibility to improve the sustainability of a biomass boiler using TRNSYS, Sustainable Cities and Society, Volume 43, Pages 86-94.

- Cui, X., Newman, S., Xu, X., Andrews, A.E., Miller, J., Lehman, S., Jeong, S., Zhang, J., Priest, C., Campos-Pineda, M., Gurney, K.R., Graven, H., Southon, J., Fischer, M.L., 2019.** Atmospheric Observation-Based Estimation Of Fossil Fuel Co₂ Emissions From Regions Of Central And Southern California, *Science Of The Total Environment*, Volume 664, Pages 381-391.
- Çengel, Y.A., Boles, M.A., 2015.** Mühendislik Yaklaşımıyla Termodinamik, 7. Baskı, Palme Yayıncılık.
- Day, C., Day, G., 2017.** Climate Change, Fossil Fuel Prices And Depletion: The Rationale For A Falling Export Tax, *Economic Modelling*, Volume 63, Pages 153-160.
- Devanand, A., Kraft, M., Karimi, I., 2019.** Optimal Site Selection For Modular Nuclear Power Plants, *Computers & Chemical Engineering*, Volume 125, Pages 339-350.
- Dincer, I., 2002.** The Role Of Exergy In Energy Policy Making, *Energy Policy*, 30, 137–149.
- Dinçer, I., Rosen, M.A., 2013.** Exergy, Energy, Environment And Sustainable Development, Elsevier.
- Dudek, M., Kolenda, Z., Jaszczur, M., Stanek, W., 2018** Thermodynamic analysis of power generation cycles with High Temperature Gas Cooled Nuclear Reactor HTGR and additional coolant heating up to 1600C, *Journal of Energy Resources Technology*.
- Duffey, P.R., 2019.** Current Status Of Electricity Generation In The World And Future Of Nuclear Power Industry, *Managing Global Warming, An Interface Of Technology And Human Issues*, Pages 67-114.
- Environment Agency, 2017.** Cooling Water Options for the New Generation of Nuclear Power Stations in the UK.
- Fanning, T.H., 2007.** Sodium as a Fast Reactor Coolant, U.S. Department of Energy U.S. Nuclear Regulatory Commission Topical Seminar Series on Sodium Fast Reactors.
- Ferguson, C., 2011.** Nuclear Energy What Everyone Needs to Know, Oxford University Press.
- Forsberg, C., 2002.** Molten Salt Reactors (MSRs) For Electricity and Waste Destruction, Presentation of Generation IV Nuclear Energy System Concept to Office Of Nuclear Energy.
- Forsberg, C., 2004.** The Advanced High-Temperature Reactor: High-Temperature Fuel, Molten Salt Coolant, and Liquid-Metal-Reactor Plant, 1st International Conference on Innovative Nuclear Energy Systems for Sustainable Development of the World (COE INES-1) Tokyo Institute of Technology, p:1-13.
- Forsberg, C.W., Renault, C., Le Brun, C., Merle-Lucotte, E., Ignatiev, V., 2007.** Liquid Salt Applications and Molten Salt Reactors, *Proceedings of ICAPP '07*.

- Granovskii, M., Dincer, I., Rosen, M., Pioro, I., 2007.** Exergy analysis of a system using a chemical heat pump to link a supercritical water-cooled nuclear reactor and a thermochemical water splitting cycle. 13th International Conference on Emerging Nuclear Energy Systems.
- Harding, P., 2016.** Uranium Enrichment, Uranium For Nuclear Power, Resources, Mining And Transformation To Fuel, Pages 321-351.
- Hassan, I.A., Badawi, A.A., El Saghir, A., Shaat, M.K., 2019.** Viability Of Uranium Nitride (Un) As Annular Fuel For Ap-1000, Progress In Nuclear Energy, Volume 110, Pages 170-177.
- Haubenreich, P.N., Engel, J.R., 1970.** Experience with the Molten-Salt Reactor Experiment, Nuclear Applications and Technology, 8:2, 118-136, DOI: 10.13182/ NT8-2-118.
- Ho, M. K. M., Yeoh, G.H., Braoudakis, G., 2013.** Molten salt reactors, Materials and processes for energy: communicating current research and technological developments, Edition: 1, Publisher: Formatex Research Center, Editors: A. Méndez-Vilas, pp.8.
- Hore-Lacy, I., 2007,** Electricity Today And Tomorrow, Nuclear Energy in The 21st Century, Pages 21-36.
- Hore-Lacy, I., 2016,** Uranium For Nuclear Power: An Introduction, Uranium For Nuclear Power, Resources, Mining And Transformation To Fuel, Pages 3-10.
- Höök, M., Tang, X., 2013.** Depletion Of Fossil Fuels And Anthropogenic Climate Change-A Review, Energy Policy, Volume 52, Pages 797-809.
- IAEA, 2014.** “Advances in Small Modular Reactor Technology Developments,” September.
- IEE, 2005.** Nuclear Reactor Types, The Institution of Electrical Engineers.
- Inayat, A., Raza, M., 2019.** District Cooling System Via Renewable Energy Sources: A Review, Renewable And Sustainable Energy Reviews, Volume 107, Pages 360-373.
- Ingersoll, D.T., 2016.** Understanding Nuclear Reactors, Small Modular Reactors, Nuclear Power Fad Or Future?, Pages 61-70.
- IRSN, 2012.** Overview of Generation IV (Gen IV) Reactor Designs // Safety and Radiological Protection Considerations.
- IRSN, 2018.** Review of Generation IV Nuclear Energy Systems.
- Johnson G.A., McDowell M.W., O'Connor G.M., Sonwane C.G., Subbaraman G., 2012.** Supercritical CO₂ Cycle Development at Pratt and Whitney Rocketdyne. ASME. Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air, Volume 5: Manufacturing Materials and Metallurgy; Marine; Microturbines and Small Turbomachinery; Supercritical CO₂ Power Cycles, pages:1015-1024.

- Kandiyoti, R., Herod, A., Bartle, K., Morgan, T., 2017.** Fossil Fuels And Renewables, Solid Fuels And Heavy Hydrocarbon Liquids (Second Edition), Thermal Characterization And Analysis, Pages 1-9.
- Karasmanaki, E., Tsantopoulos, G., 2019.** Exploring Future Scientists' Awareness About And Attitudes Towards Renewable Energy Sources, Energy Policy, Volume 131, Pages 111-119.
- Khoshahval, F., Ahdavi, A.A., 2016.** Determination of the maximum speed of WWER-1000 nuclear reactor control rods, Annals of Nuclear Energy, Volume 87, Part 2, Pages 58-68.
- Kim, J.S., Boardman, R.D., Bragg-Sitton, S.M., 2018.** Dynamic performance analysis of a high-temperature steam electrolysis plant integrated within nuclear-renewable hybrid energy systems, Applied Energy, Volume 228, Pages 2090-2110.
- Kong, F., Li, Y., Sa, R., Bai, Y., Jin, M., Song, Y., 2019.** Design And Thermodynamic Analysis Of Supercritical CO₂ Reheating Recompression Brayton Cycle Coupled With Lead-Based Reactor, Int J Energy Res., 1–9.
- Krane, K.S., 1987.** Introductory Nuclear Physics, John Wiley & Sons, Inc.
- LeBlanc, D., 2010.** Molten salt reactors: A new beginning for an old idea, Nuclear Engineering and Design 240, p: 1644–1656.
- Li, H., Xu, M., Xiao, Y., Li, J., Su, W., Wang, J., Dai, Y., 2018.** Preliminary conceptual exploration about performance improvement on supercritical CO₂ power system via integrating with different absorption power generation systems, Energy Conversion and Management, Volume 173, Pages 219-232.
- Liu, C., Cheng, M.S., Zhao, B.C., Dai, Z.M., 2017.** Thermal performance analysis of a thermocline thermal energy storage system with FLiNaK molten salt, Earth and Environmental Science.
- Liu, L., Zhang, D., Qiu, S.Z., Su, G., 2016.** Investigation of the Modified RELAP5 MOD 3.2 Capability to Simulate the Transients of the Fluoride-Salt High Temperature Reactors, 24th International Conference on Nuclear Engineering.
- Liu, L., Zhang, D., Yan, Q., Xu, R., Wang, C., Qiu, S., Su, G.H., 2017.** RELAP5 MOD3.2 modification and application to the transient analysis of a fluoride-salt-cooled high temperature reactor, Annals of Nuclear Energy, p: 504–515.
- Luo, C., Zhao, F., Zhang, N., 2014.** A Novel Nuclear Combined Power And Cooling System Integrating High Temperature Gas-Cooled Reactor With Ammonia–Water Cycle, Energy Conversion and Management, Volume 87, Pages 895-904.
- Makhijani, A., 2004.** Uranium Enrichment, Just Plain Facts to Fuel an Informed Debate on Nuclear Proliferation and Nuclear Power, Institute For Energy and Enviromental Research.
- Masterson, R., 2016.** Nucler Engineering Fundamentals A Practical Perspective, CRC Press.

- Matthews R.B., Chidester, K.M., Hoth, C.W., Mason, R.E., Petty, R.L., 1987.** Fabrication and Testing Of Uranium Nitride Fuel For Space Power Reactors.
- Mohammadi, Z., Fallah, M., Seyed Mahmoudi, S.M., 2019.** Advanced Exergy Analysis Of Recompression Supercritical CO₂ Cycle, *Energy*, Volume 178, Pages 631-643.
- Mohammadkhani, F., Shokati, N., Mahmoudi, S.M.S., Yari, M., Rosen, M.A., 2014.** Exergoeconomic Assessment And Parametric Study Of A Gas Turbine-Modular Helium Reactor Combined With Two Organic Rankine Cycles, *Energy*, Volume 65, Pages 533-543.
- Ol, N., Hirayama, S., Tanabe, I., Muramatsu, A., Kawada, T., 2012.** Preparation of High Density Uranium Nitride and Uranium Carbonitride Fuel Pellets.
- Omar, A., Saghaififar, M., Mohammadi, K., Alashkar, A., Gadalla, M., 2019.** A review of unconventional bottoming cycles for waste heat recovery: Part II – Applications, *Energy Conversion and Management*, Volume 180, Pages 559-583.
- Özsaban, M., 2009.** Yüksek Basınçta Hidrojen Depolama İşleminin Termodinamik Modellenmesi ve Enerji Sürdürülebilirlik Analizi, Niğde Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi.
- Park, J.H., Park, H.S., Kwon, J.G., Kim, T.H., Kim, M.H., 2018.** Optimization and thermodynamic analysis of supercritical CO₂ Brayton recompression cycle for various small modular reactors, *Energy*, Pages: 520-535.
- Park, J.H., Yoon, J., Eoh, J., Kim, H., Kim M.H., 2018.** Optimization and sensitivity analysis of the nitrogen Brayton cycle as a power conversion system for a sodium-cooled fast reactor, *Nuclear Engineering and Design* 340, pages: 325–334.
- Parma, E.J., Wright, S.A., Vernon, M.E., Fleming, D.D., Rochau, G.E., Suo-Anttila, A.J., Al Rashdan, A., Tsvetkov, P.V., 2011.** Supercritical CO₂ Direct Cycle Gas Fast Reactor (SC GFR) Concept, Sandia National Laboratories.
- Pasaoglu, G., Garcia, N.P., Zubi, G., 2018.** A Multi-Criteria And Multi-Expert Decision Aid Approach To Evaluate The Future Turkish Power Plant Portfolio, *Energy Policy*, Volume 119, Pages 654-665.
- Peterson, P.F., 2003.** Molten-Salt-Cooled Advanced High-Temperature Reactor for Production of Hydrogen and Electricity, Oak Ridge National Laboratory, p: 1-25.
- Pioro, I., 2016.** Handbook of Generation IV Nuclear Reactors, Woodhead Publishing.
- Priego, E., Alonso, G., del Valle, E., Ramirez, R., 2017.** Alternatives Of Steam Extraction For Desalination Purposes Using SMART Reactor, *Desalination*, Volume 413, Pages 199-216.
- Riznic, J., 2017.** Steam Generators for Nuclear Power Plants, Woodhead Publishing First Edition.
- Rosen M.A. ve Scott D.S., 1986.** Energy and Exergy Analyses of a Nuclear Steam Power Plant, 7th Annual Conference 198, Canadian Nuclear Society.
- Sahin, A.Z., 2019.** Importance of Exergy Analysis in Industrial Processes.

- Schröders, S., Allelein, H., 2018.** Energy economic evaluation of process heat supply by solar tower and high temperature reactor based on the ammonia production process, *Applied Energy*, Volume 212, Pages 622-639.
- Setty, D.S., Kapoor, K., Saibaba, N., 2017.** Nuclear fuel cycle - developments and challenges in fuel fabrication technology in India, *Progress in Nuclear Energy*, Volume 101, Part A, Pages 100-117.
- Stanek, W., Simla, T., Gazda, W., 2019.** Exergetic And Thermo-Ecological Assessment Of Heat Pump Supported By Electricity From Renewable Sources, *Renewable Energy*, Volume 131, Pages 404-412.
- Sun, H., Wang, C., Ma, P., Liu, X., Tian, W., Qiu, S., Su, G., 2018.** Conceptual design and analysis of a multipurpose micro nuclear reactor power source, *Annals of Nuclear Energy*, pages: 118, 127.
- Supko, E., 2016.** Nuclear fuel fabrication, *Uranium for Nuclear Power, Resources, Mining and Transformation to Fuel*, Pages 353-382.
- Tchalakov, I., Hristov, I., 2019.** The Bulgarian Nuclear Sector In Transition: Adopted Russian Technology, State Sovereignty And Accession To The Eu, *Environmental Innovation And Societal Transitions*.
- Tchalakov, I., Mitev, T., 2019.** Energy Dependence Behind The Iron Curtain: The Bulgarian Experience, *Energy Policy*, Volume 126, Pages 47-56.
- Terzi, R., Tükenmez, İ., Kurt, E., 2016.** Energy And Exergy Analyses Of A VVER Type Nuclear Power Plant, *International Journal Of Hydrogen Energy*.
- Terzi, R., 2016.** VVER Nükleer Güç Santralinin Ekserji Analizi, Gazi Üniversitesi, Doktora Tezi.
- Theus, G., 2010.** Generation IV Nuclear Reactors.
- URL-1, 2019.** <https://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-power-reactors/small-nuclear-power-reactors.aspx> (5 Mayıs 2019).
- URL-2, 2019.** <https://teachnuclear.ca/all-things-nuclear/nuclear-energy/types-of-reactors> (6 Mayıs 2019).
- URL-3, 2019.** https://en.wikipedia.org/wiki/Heavy_water (8 Mayıs 2019).
- URL-4, 2019.** https://en.wikipedia.org/wiki/Light_water (1 Haziran 2019).
- URL-5, 2019.** <https://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-power-reactors/generation-iv-nuclear-reactors.aspx> (6 Haziran 2019).

- URL-6, 2019.** <https://web.archive.org/web/20060218062116> (8 Haziran 2019).
- URL-7, 2019.** <https://www.world-nuclear.org/information-library/current-and-future-generation/lithium.aspx> (10 Haziran 2019).
- URL-8, 2019.** <https://www.world-nuclear.org/information-library/current-and-future-generation/fast-neutron-reactors.aspx> (10 Haziran 2019).
- URL-9, 2019.** <https://www.iaea.org/topics/fast-reactors> (11 Haziran 2019).
- URL-10, 2019.** <https://www.powermag.com/rapid-advancements-for-fast-reactors/> (12 Haziran 2019).
- URL-11, 2019.** <https://www.world-nuclear.org/information-library/current-and-future-generation/molten-salt-reactors.aspx> (12 Haziran 2019).
- URL-12, 2019.** https://en.wikipedia.org/wiki/Integral_Molten_Salt_Reactor (14 Haziran 2019).
- Ünal, İ.H., 2014.** Ocaktan Reaktöre Uranyumun Üretim Aşamaları, sayfa 1-6.
- Ünsal, V., 2010.** CANDU 6 Nükleer Güç Santralini Ekserji Analizi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Enerji Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi.
- Vegel, B., Quinn, J.C., 2017.** Economic Evaluation Of Small Modular Nuclear Reactors And The Complications Of Regulatory Fee Structures, Energy Policy, Volume 104, Pages 395-403.
- Wang, Y., Zhang, H., Huai, X., Li, X., Cai, J., Xi, W., 2017.** Exergy Analysis Of LBE-Helium Heat Exchanger In The Experimental Cooling Loop Based On Accelerator Driven Sub-Critical Power System, Energy Conversion and Management, Volume 135, Pages 274-280.
- Wark, K., 1983.** Thermodynamics, McGraw-Hill, 4th Edition.
- Wilks, J., 2012.** Uranium Conversion And Enrichment, Nuclear Fuel Cycle Science And Engineering, Woodhead Publishing Series In Energy, Pages 151-176.
- Wilson, G., Sahoo, S., Sabharwal, P., Bindra, H., 2019.** Chapter Seven - Packed Bed Thermal Storage for LWRs, Storage and Hybridization of Nuclear Energy, Techno-economic Integration of Renewable and Nuclear Energy, Pages 229-248.
- Zada, K., Kim, R., Wildberger, A., Schalansky, C., 2018.** Analysis of Supercritical CO2 Brayton Cycle Recuperative Heat Exchanger Size and Capital Cost with Variation of Layout Design, Pages 1-18.

ÖZGEÇMİŞ

Muhammed Emin TOPAL, 1993 yılında Samsun-Havza’da doğdu. 2011 yılında Rize Tevfik İleri Anadolu Lisesi’ni bitirdi. Lisans eğitimini Uludağ Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümünde tamamladı. Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı’nda Ocak 2017’de yüksek lisans öğrenimine başladı. Halen Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü Enerji Anabilim Dalı’nda araştırma görevlisi olarak görev yapmaktadır.

