



**HİBRİT NANO SOĞUTUCU AKIŞKAN KULLANILARAK VVER-1000
NÜKLEER REAKTÖRÜNÜN TERMAL HİDROLİK ANALİZİ**

Tuba Sinecan TUNÇ

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

OCAK 2023

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Tuba Sinecan TUNÇ

23/12/2023

HİBRİT NANO SOĞUTUCU AKIŞKAN KULLANILARAK VVER-1000 NÜKLEER REAKTÖRÜNÜN TERMAL HİDROLİK ANALİZİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Tuba Sinecan TUNÇ

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Ocak 2023

ÖZET

Bu çalışmada, % 3,7 zenginleştirilmiş uranyum dioksit (UO_2) nükleer yakıtlı VVER-1000 nükleer reaktöründe hibrit nanoparçacıklı soğutucu akışkanlar kullanılarak reaktörün termal hidrolik analizi incelenmiştir. Hesaplamalarda reaktör koru homojen olarak ele alınmış ve termal hidrolik analizi COBRA-IV PC kodu ile yapılmıştır. Hesaplamalarda hibrit nanoparçacıklı soğutucu akışkan yapılarının (% 0,1 Al_2O_3 ; % 0,1 Al_2O_3 + % 0,1 MgO ; % 0,1 Al_2O_3 + % 0,2 MgO ; % 0,1 Al_2O_3 + % 0,3 MgO ; % 0,1 Al_2O_3 + % 0,1 ZnO ; % 0,1 Al_2O_3 + % 0,2 ZnO ; % 0,1 Al_2O_3 + % 0,3 ZnO) termal hidrolik analize etkisi incelenmiştir. Yapılan hesaplamalarda kanal boyunca oluşan sıcaklık dağılımı, yoğunluk değişimi, entalpi ve çekirdek-akışkan kaynamasından ayrılma (DNBR-Departure from Nucleate Boiling) oranı araştırılmıştır. % 0,1 Al_2O_3 soğutuculu reaktör korunda kanal boyunca soğutucunun ulaştığı en yüksek sıcaklık 609,81 K ve en düşük DNBR değeri 3,38 olarak hesaplanmıştır. % 0,1 Al_2O_3 + % 0,3 MgO soğutuculu reaktör korunda kanal boyunca soğutucunun ulaştığı en yüksek sıcaklık 613,67 K ve en düşük DNBR değeri 2,58 olarak elde edilir iken, % 0,1 Al_2O_3 + % 0,3 ZnO soğutuculu akışkan için bu değerler 613,67 K ve en düşük DNBR değeri 2,60 olarak hesaplanmıştır. Isı transferinin iyileştirilmesi ve reaktör güvenliği açısından Al_2O_3 soğutucu içerisinde hibrit parçacık hacminin artmasının avantaj sağladığı görülmüştür.

Bilim Kodu : 92805

Anahtar Kelimeler : Nükleer Enerji Sistemleri, Termal Hidrolik Analiz, Nano akışkanlar

Sayfa Adedi : 51

Danışman : Prof. Dr. Adem ACIR

İkinci Danışman : Dr. Öğr. Üyesi Sinem UZUN

THERMAL HYDRAULIC ANALYSIS OF VVER-1000 NUCLEAR REACTOR USING COOLANT CONTAINING HYBRID NANO PARTICLES

(M.Sc Thesis)

Tuba Sinecan TUNÇ

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

January 2023

ABSTRACT

In this study, thermal hydraulic analysis of the reactor was investigated by using hybrid nanoparticle coolant in the VVER-1000 nuclear reactor with 3,7 % enriched uranium dioxide (UO_2) nuclear fuel. In the calculations, the reactor core was considered homogeneously and the thermal hydraulic analysis was done with the COBRA-IV PC code. In the calculations, the effect of hybrid nanoparticle coolant structures (% 0.1 Al_2O_3 ; % 0.1 Al_2O_3 + % 0,1 MgO; % 0.1 Al_2O_3 + % 0.2 MgO; % 0.1 Al_2O_3 + % 0.3 MgO; % 0.1 Al_2O_3 + % 0.1 ZnO; % 0.1 Al_2O_3 + % 0.2 ZnO; % 0.1 Al_2O_3 + % 0.3 ZnO) on thermal hydraulic analysis was investigated. In the calculations, the temperature distribution, density change, enthalpy and the Departure from Nucleate Boiling (DNBR) along the channel were investigated. In the reactor core with 0,1% Al_2O_3 coolant, the highest temperature reached by the coolant along the channel was calculated as 609,81 K and the lowest DNBR value was 3,38. In the reactor core with 0.1 % Al_2O_3 + 0.3 % MgO coolant, the highest temperature reached by the coolant along the channel was 613,67 K and the lowest DNBR value was 2,58, while these values were 613,67 K and the lowest DNBR value as 2,60 for 0.1 % Al_2O_3 + 0.3 % ZnO coolant. It has been observed that increasing the volume of hybrid particles in the Al_2O_3 coolant provides an advantage in terms of enhancement the heat transfer and reactor safety.

Science Code : 92805

Key Words : Nuclear energy systems, thermal hydraulic analysis, nanofluids

Page Number : 51

Supervisor : Prof. Dr. Adem ACIR

Co-Supervisor : Assist. Prof. Dr. Sinem UZUN

TEŞEKKÜR

Çalıőmam süresince desteklerini esirgemeyen, yol gösteren ve yüksek lisans eğitimimi tamamlamamda emeği geçen değerli tez danıőmanım Prof. Dr. Adem ACIR'a en içten teőekkürlerimi ve saygılarımı sunuyorum.

Bu süreçte bilgileriyle destek olan deđerli hocam Dr. Öğr. Üyesi Sinem UZUN'a teőekkürlerimi sunuyorum.

Beni yetiőtiren, her koşulda destek olan, sevgilerini ve desteklerini benden esirgemeyen aileme tüm fedakarlıkları için sonsuz teőekkürlerimi ve sevgilerimi sunuyorum.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	xiv
RESİMLERİN LİSTESİ.....	xv
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xvi
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR TARAMASI	5
3. NÜKLEER REAKTÖRLER	9
3.1. Hafif Su Reaktörleri (Light Water Reactor – LWR).....	11
3.1.1. Basınçlı su reaktörleri (pwr – pressurized water reactor)	11
3.1.2. Rus tipi basınçlı su reaktörleri (voda-vodyanoi energetichesky reaktor VVER)	12
3.1.3. Kaynar su reaktörleri (boiling water reactor – BWR).....	17
3.2. Ağır Su Reaktörleri (Heavy Water Reactor).....	18
3.3. Gaz Soğutmalı Reaktörler (Gas Cooled Reactor – GCR).....	19
4. MATERYAL VE YÖNTEM.....	21
4.1. COBRA IV Kodu.....	23
4.2. Nano Akışkanlar.....	26
5. NÜMERİK SONUÇLAR	29
6. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	45

Sayfa

KAYNAKLAR	47
ÖZGEÇMİŞ	51

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. Reaktörlerde nano akışkan etkisini gözlemleyen çalışmalar	7
Çizelge 3.1. Dünya’da nükleer reaktörlerin durumu	10
Çizelge 3.2. Reaktör türüne göre özellikler	11
Çizelge 3.3. VVER reaktörlerinin özellikleri	14
Çizelge 3.4. VVER-1000’lerin genel özellikleri.....	17
Çizelge 4.1. Reaktör özellikleri	21
Çizelge 4.2. Su ve nanoparçacıkların termofiziksel özellikleri	27
Çizelge 5.1. Hesaplamalarda kullanılan hibrit soğutucu akışkan modelleri.....	30

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 4.1. MCNP kodu ile modellenmiş kor	22
Şekil 4.2. a) % 0,01, b) % 0,05, c) % 0,1, d) % 0,2 hacimli Al ₂ O ₃ nanoparçacıklı soğutucu eklenmiş reaktörün MCNP kor modeli	23
Şekil 5.1. Modellenen bir kanalın akış alanı gösterimi.....	29
Şekil 5.2. MgO için soğutucu sıcaklığının kanal boyu değişimi	32
Şekil 5.3. ZnO için soğutucu sıcaklığının kanal boyu değişimi	33
Şekil 5.4. MgO durumları için yoğunluk değişimleri	35
Şekil 5.5. ZnO durumları için yoğunluk değişimleri	36
Şekil 5.6. MgO durumları için entalpi değişimleri	38
Şekil 5.7. ZnO durumları için entalpi değişimleri	39
Şekil 5.8. MgO durumları için DNBR değişimleri	42
Şekil 5.9. ZnO durumları için DNBR değişimleri	43

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 3.1. İlk VVER tasarımı - Novovoronezh 1.....	13
Resim 3.2. VVER-1200 Akkuyu Nükleer Güç Santrali İnşaatı	14
Resim 3.3. Yatay VVER buhar üreteçleri.....	16
Resim 3.4. Bir BWR santral sahası – Enrica Fermi Nükleer Santrali.....	18
Resim 3.5. Bir PHWR santral sahası – Bruce Nükleer Santrali	19
Resim 3.6. Bir GCR santral sahası	19
Resim 4.2. Nötronik ve termohidrolik analizler arasındaki bağlantısallık	25

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler

Açıklamalar

Al	Alüminyum
Al₂O₃	Alümina
cm	Santimetre
g	Gram
K	Kelvin
keff	Etkin çoğaltma katsayısı
kg	Kilogram
Mg	Magnezyum
MgO	Magnezyum oksit
Mwd/tU	Megawatt gün / ton uranyum
MWe	Megawatt elektrik
Th	Toryum
U	Uranyum
UO₂	Uranyum dioksit
Zn	Çinko
ZnO	Çinko oksit

Kısaltmalar

Açıklamalar

BWR	Boiling Water Reactor
CANDU	CANada Deuterium-Uranium reactor
COBRA	Coolant Boiling in Rod Arrays
DNBR	Departure from Nucleate Boiling Ratio
FBR	Fast Breeder Reactor
FSAR	Final Safety Analyses Report
GCR	Gas Cooled Reactors
HTGR	High Temperature Gas Cooled Reactor

Kısaltmalar**Açıklamalar****HWGCR**

Heavy-Water Moderated, Gas Cooled Reactor

HWLWR

Heavy-Water Mod., Boiling LW Cooled Reactor

IAEA

International Atomic Energy Agency

LWR

Light Water Reactor

LWGR

Light Water Graphite Reactor

PHWR

Pressurized Heavy-Water Mod. and Cooled Reactor

PRIS

Power Reactor Information System

PWR

Pressurized Water Reactor

SGHWR

Steam Generating Heavy-Water Reactor

TAEK

Türkiye Atom Enerji Kurumu

VVER

Vodo-Vodyanöl Energetichesky Reaktor

1. GİRİŞ

Günümüzde gelişen teknoloji, sanayileşme, globalleşen piyasalar ve artan dünya nüfusunun bir sonucu olarak enerji ihtiyacı Dünya genelinde hızla artmaktadır. Enerji ihtiyacının karşılanması için birçok kaynak yüzyıllardan beri kullanılmaktadır. Petrol, doğalgaz, kömür gibi geleneksel enerji kaynaklarının tükenme olasılığı ve çevreye verdikleri zarar düşünülerek; bu kaynaklara alternatif daha çevreci ve sürdürülebilir kaynakların kullanımı önem kazanmaya başlamıştır. Güneş enerjisi, rüzgar enerjisi, jeotermal enerji gibi yenilenebilir enerji kaynakları hızla popülerlik kazanırken bunların yanında nükleer enerjinin kullanımı da dünya genelinde yaygınlaşmıştır.

Dünya genelinde kullanılan enerji kaynakları, yenilenebilir ve yenilenemez enerji kaynakları olarak iki ana sınıfta değerlendirilebilmektedir. Yenilenebilir enerji kaynakları; güneş enerjisi, rüzgar enerjisi, hidrolik enerji, jeotermal enerji, dalga enerjisi ve biyokütle enerjisi gibi kendisini doğada sürekli olarak yenileyebilen enerji kaynaklarıdır. Yenilenemez enerji kaynakları ise; kömür, doğalgaz, petrol, nükleer gibi doğada sınırlı bulunan kaynaklardır. BP (British Petroleum)'nin 2010 yılında yayınladığı rapora göre, Dünya genelinde petrolün 45,7 yıl, doğalgazın 62,8 yıl ve kömürün 119 yıl daha kullanılabilir bilinen rezervi bulunmaktadır. Rezervlerin ömrünün tükeniyor olmasıyla birlikte yenilenebilir kaynaklara ve nükleer enerjiye ilginin arttığı görülmektedir. Ayrıca tükenmekte olan fosil yakıtlardan, yenilenebilir kaynaklara ve nükleere dönüşün bir diğer sebebi çevreye verilen zararın boyutudur. Türkiye İstatistik Kurumu verilerine göre 2020 yılında gerçekleşen sera gazı salınımının %70,2'si enerji kaynaklı emisyonlardır [1]. Atmosfere salınan karbondioksit (CO₂) küresel ısınmaya sebep olurken, kükürtdioksit (SO₂) ve azotdioksit (NO₂) asit yağmurlarına sebep olmaktadır. 1000 MW'lık bir kömür santrali her yıl yaklaşık 100.000 ton kükürtdioksit, 75 000 ton azotoksit ve 5 000 ton uçucu kül salar. Buna karşılık olarak aynı güçteki bir nükleer santralin çevreye verdiği zarar eser miktarda radyoaktif gaz iken güneş, rüzgar gibi yenilenebilir kaynaklar çevreye herhangi bir zararlı gaz yaymazlar. 1999'da ABD'deki elektriğin %20'sinin nükleer enerjiden üretilmesi sayesinde 150 milyon ton karbondioksit emisyonundan kaçınılmıştır [2]. Tükenmekte olan ve çevreye daha zararlı olduğu bilinen fosil yakıtlar yerine, Dünya, yenilenebilir kaynaklara ve nükleere doğru bir eğilim içerisindedir.

Nükleer teknoloji, günümüzde enerji üretiminin yanı sıra; sanayi, uzay çalışmaları, tıp, tarım, gıda güvenliği, askeri araçlar gibi birçok alanda kullanılmaktadır. Nükleer teknolojiyi kullanan devletlerin temel amacı, evrensel değerlere saygılı ve barışçıl amaçlarla kullanımına dair anlaşma içerisinde olmaktır.

Nükleer reaktörler, fisyon (çekirdek bölünmesi) ve füzyon (çekirdek birleşmesi) olaylarının sonucunda ortaya çıkan enerjiyi güvenli ve kontrollü bir şekilde ısı enerjisine dönüştüren sistemlerdir. Oluşan ısıdan, herhangi bir termik santralde olduğu gibi, buhar elde edilerek, buhar türbini ve jeneratör yardımı ile elektrik enerjisine dönüştürülmesini sağlayan sistemler ise nükleer santrallerdir.

1951'de Idaho'daki Ulusal Reaktör Test İstasyonu'nda ilk defa fisyon ile üretilen kullanılabilir elektrik üretimi gerçekleştirilmiştir. Daha sonrasında 1957'de Shippingport (ABD)'de ilk ticari nükleer reaktörü hizmete alınmıştır [3]. Uluslararası Atom Enerjisi Ajansı'nın "Güç Reaktörü Bilgi Sistemi – Power Reactor Information System (PRIS)" verilerine göre; Aralık 2022 itibariyle, işletim halinde 422 tane nükleer reaktör bulunmaktadır. Bu kurulu reaktörlerin net kurulu güçleri toplamı 378 314 MWe olarak kayıtlarda yer alır. Bu da dünya geneli elektrik üretiminin yaklaşık olarak %17'sini oluşturmaktadır. Nükleer enerji ile elektrik üretiminden en çok faydalanan ülkeler arasında 92 kurulu kullanım halinde santral ile Amerika Birleşik Devletleri ilk sırada yer almaktadır. Onu 56 santral ile Fransa ve 55 santral ile Çin takip etmektedir. Kurulu nükleer santrallerin yanı sıra yapım aşamasında olan 57 adet nükleer santral yer almaktadır. Yapımı süren nükleer santrallerin 18 tanesi büyük bir nüfusa sahip, gelişimini sürdüren bir ülke olan Çin'de yer almaktadır [4]. Ülkemizde ise 1 adet 4 üniteli, toplam 4 800 MW kurulu güce sahip VVER-1200 tipi basınçlı su reaktörünün inşası devam etmektedir.

Nükleer enerjinin temeli fisyon ve füzyona dayanmaktadır. Fisyon; çekirdek bölünmesi olarak bilinir ve ilk olarak Alman bilim insanları Otto Hann ve Fritz Strassmann'nın çalışmalarında bu terime yer verilmiştir. Hann ve Strassmann'ın radyoaktivite üzerine yaptıkları çalışmalar sonucunda uranyumun fisyon gerçekleştirdiği ilk kez gözlemlenmiştir [5]. Fisyon; U^{235} , Pu^{239} gibi ağır çekirdeklere çarpan bir nötron sonucu bölünmesi prensibine dayanmaktadır. Fisyon sonucunda büyük bir enerji açığa çıkmakta ve bu ortaya çıkan fisyon enerjisi buhar çevrimleri yardımıyla nükleer santrallerde elektriğe dönüştürülmektedir.

Füzyon ise fisyonun aksine, iki radyoaktif hafif çekirdeğin birleşerek ağır çekirdeğe dönüşmesi prensibine dayanmaktadır.

Günümüzde ticari olarak kullanılan nükleer reaktörler fisyon (çekirdek bölünmesi) reaktörleridir. Dünya çapında yaygın olarak; Hafif Su Reaktörleri (LWR) sınıfında yer alan Basınçlı Su Reaktörleri (PWR) ve Kaynar Su Reaktörleri (BWR)'nin yanı sıra Kanada yapımı ağır su reaktörü CANDU ve Rus tipi basınçlı su reaktörü VVER (Vodo-Vodyanoi Energetichesky Reaktor) kullanılmaktadır. Halihazırda kullanılmakta olan reaktörlerin 303 tanesi PWR, 49 tanesi de BWR'dır. Füzyon (çekirdek birleşmesi) reaktörlerinin kullanımı için ise çalışmalar devam etmektedir.

Bu tez çalışması kapsamında % 3,7 zenginleştirilmiş uranyum dioksit (UO_2) yakıtlı VVER-1000 nükleer reaktöründe hibrit nanoparçacıklı soğutucu akışkanlar kullanılarak reaktörün termal hidrolik analizi incelenmiştir. Hesaplamalarda reaktör koru homojen olarak ele alınmış ve termal hidrolik analizi COBRA-IV PC [6] kodu ile yapılmıştır. Hesaplamalarda hibrit nanoparçacıklı soğutucu akışkan yapılarının (% 0,1 Al_2O_3 ; % 0,1 Al_2O_3 + % 0,1 MgO ; % 0,1 Al_2O_3 + % 0,2 MgO ; % 0,1 Al_2O_3 + % 0,3 MgO ; % 0,1 Al_2O_3 + % 0,1 ZnO ; % 0,1 Al_2O_3 + % 0,2 ZnO ; % 0,1 Al_2O_3 + % 0,3 ZnO) termal hidrolik analize etkisi incelenmiştir. Yapılan hesaplamalarda kanal boyunca oluşan sıcaklık dağılımı, yoğunluk değişimi, entalpi ve çekirdek-akışkan kaynamasından ayrılma (DNBR - Departure from Nucleate Boiling) oranı araştırılmıştır. Isı transferinin iyileştirilmesi ve reaktör güvenliği açısından Al_2O_3 soğutucu içerisinde hibrit parçacık hacminin artmasının avantaj sağladığı görülmüştür.

2. LİTERATÜR TARAMASI

Bu çalışmada nükleer reaktörde soğutucuya eklenen nanoparçacık etkisi gözlemlenmiş olup geçmiş dönemlerde benzer konularda yapılan çalışmalar incelenmiştir.

Hadad ve arkadaşları, VVER-1000 reaktörü özelinde yaptıkları bu çalışmada soğutucuda nano akışkan kullanılmasının etkilerini araştırmışlardır. Çalışmada; reaktivite değişimi, radyal ve aksel lokal tepe faktörleri (Local Power Peaking Factor - LPPF) ve yakıt kaplı nanoparçacık birikmesinin sonuçları değerlendirilmiştir. Nanoparçacık olarak alüminyum, alümina (Al_2O_3), bakır, bakır oksit (CuO) ve zirkonya (ZrO_2) üzerinde kapsamlı çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın sonuçları gösteriyor ki % 0,1 oranında kullanılan Al_2O_3 çalışmada karşılaştırılan diğer nanoparçacıklara göre en uygun olanıdır. Bununla birlikte CuO ve ZrO_2 'nin güvenliği artırmak amacıyla daha pratik olduğu da çalışmanın sonuçları arasındadır [7].

Zarifi ve arkadaşları, gerçekleştirmiş oldukları çalışma ile soğutucuya eklenen nano akışkan ile VVER-1000 reaktöründe nötronik simülasyon gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada Al_2O_3 , Si, Zr, TiO_2 , CuO , Ti, Cu ve Ag nanoparçacıkları farklı oranlarda soğutucuya karıştırılarak analizler gerçekleştirilmiştir. WIMS ve CITATION kodları kullanılarak elde edilen sonuçlar, nanoparçacıkların hacim yüzdesini artırarak, reaktör çekirdeğindeki nötron yavaşlatıcı oranının azalması nedeniyle çoğalma faktörünün ciddi şekilde azalacağını göstermektedir. Farklı nanoparçacıkların reaktör verimliliği üzerindeki etkisine bakıldığında ise % 0,1 oranında Al_2O_3 nanoparçacığının en uygun parçacık olduğu görülmüştür [8].

Safarzadeh ve arkadaşları, VVER-1000 reaktöründe birincil soğutma sistemine eklenen nanoparçacığın nötronik ve termal hidrolik etkileri gözlemlenmiştir. Su + Al_2O_3 nano akışkan için kritik borik asit, bağıl güç dağılımı, basınç düşüşü ve yakıt, koruyucu, soğutucu sıcaklık dağılımları incelenmiştir. Düşük hacimli nanoparçacıkların kullanımının, kritik borik asitte yaklaşık % 3 etkiye sahip olduğu, bağıl güç dağılımının yaklaşık % 2'sine sahip olduğu ve ısı transferinin saf suya kıyasla arttırıldığı gözlenmiştir. Söz konusu analizler DRAGON, DONJON ve termal hidrolik modelin birleştirilmesiyle gerçekleştirilmiştir [9].

Ebrahimian ve arkadaşları, bu çalışmada, soğutma sıvısı olarak nanoparçacık/su kullanımına atfedilebilen çift soğutmalı dairesel yakıtlı VVER-1000 nükleer reaktör çekirdeğinin termal hidrolik parametrelerindeki değişimini araştırmışlardır. İlk olarak, dahili ve harici olarak soğutulmuş dairesel şeklindeki yakıtların kullanımına dayalı olarak bir VVER-1000 reaktörünün çekirdeği tasarlanmış ve yakıt çubuklarının termal hidrolik parametreleri analiz edilmiştir. Farklı nanoparçacıkların konsantrasyonlarında ve boyutlarında yapılan karşılaştırmalar sonucunda termal hidrolik açıdan en uygun parçacığın 0,03 hacimli ve 10nm boyutundaki Al_2O_3 olduğu görülmüştür [10].

Ghazanfari ve arkadaşları, yapmış oldukları araştırmada bir VVER-1000 reaktörü için soğutma sıvısı olarak nano akışkanların katı ve dairesel şeklindeki yakıtlar üzerindeki etkisini analiz etmişlerdir. Su ve suya belirli hacimlerde karıştırılan Al_2O_3 , TiO_2 ve CuO karışımları üzerinde çalışılmıştır. Nanoparçacık etkisinin gözlemlendiği bu çalışmada karşılaştırılan parçacıklar arasında en iyi sonucu Al_2O_3 'ün verdiği görülmüştür [11].

Ghazanfari ve arkadaşları, gerçekleştirdikleri bir diğer çalışmada VVER-1000 reaktöründe soğutucuya eklenen nanoparçacığın katı ve dairesel yakıtlar üzerindeki termal hidrolik analizini gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada soğutucu suya eklenen çeşitli oranlarda Al_2O_3 etkisi gözlemlenmiştir. Sonuçlar, Al_2O_3 nanoparçacık konsantrasyonu arttıkça, Al_2O_3 nano akışkanın ısı transfer katsayısının iyileştirilmesine bağlı olarak, soğutma sıvısının sıcaklığının arttığını ve merkezi yakıt sıcaklığının düşürüldüğünü göstermektedir. Son olarak, dairesel şekildeki yakıt çubuğunun soğutma sıvısı olarak nano akışkan ile kullanılmasının nükleer reaktörde en iyi verime sahip olduğu sonucuna varılmıştır [12].

Saadati ve arkadaşları, yapmış oldukları çalışma ile bir hafif su reaktöründe nano akışkan kullanımının ısı üretimi, ısının uzaklaştırılması ve nötronik-güvenlik etkileri üzerinde durulmuştur. VVER-1000/446 reaktöründe soğutucu ve yavaşlatıcı olarak su/gümüş nano akışkan seçiminin etkileri gözlemlenmiştir [13].

R. Kianpour ve G.R. Ansarifard yapmış oldukları çalışmada farklı oranlarda ve boyutlarda Al_2O_3 nanoparçacıkları kullanarak VVER-1000 reaktörü üzerinde birçok parametrede hesaplamalar gerçekleştirmişlerdir. Nanoparçacığın farklı konsantrasyon ve boyutlarında termal hidrolik hesaplamaları yapılmış ve ısı transfer katsayısı, soğutma sıvısı sıcaklığı ve yakıt gibi ısı transfer parametreleri üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Ayrıca, nötron

hesaplamaları yapılarak reaktör çekirdeği simüle edilmiş ve soğutma sıvısı ile yakıt sıcaklık değişimlerinin etkili çarpma faktörü üzerindeki etkisi hesaplanarak analiz edilmiştir [14].

Uzun ve arkadaşları, baz sıvı olarak seçtikleri su ile farklı oranlarda Al_2O_3 içeren soğutucu akışkanın bir VVER-1000 reaktörü üzerindeki termal etkisini incelemişlerdir. Yapılan çalışmada DNBR değeri, entalpi, yoğunluk, kanal sıcaklığı gibi birçok parametre incelenmiştir. Analiz sonuçları gösteriyor ki soğutucuya eklenen % 0,1 oranındaki Al_2O_3 çalışmadaki diğer soğutuculara göre dahi iyi performans göstermektedir [15].

Literatür taraması sırasında incelenen ve tez çalışmasında araştırması gerçekleştirilen VVER-1000 reaktöründe nano akışkan etkisinin gözlemlenmesine dayanan çalışmalar Çizelge 2.1’de kısaca özetlenmektedir.

Çizelge 2.1. Reaktörlerde nano akışkan etkisini gözlemleyen çalışmalar

Yıl	Yazar	Çalışmanın Konusu
2010	K. Hadad	Soğutucu olarak farklı nano akışkanlar kullanılan VVER-1000 reaktöründe nötronik analizler yapılmıştır [7].
2013	Zarifi	VVER-1000 reaktöründe farklı soğutucu nano akışkanlar kullanılarak nötronik simülasyonlar yapılmıştır [8].
2014	Safarzadeh	VVER-1000 reaktörünün birincil soğutma sisteminde nanoparçacıkların kullanılmasının termal hidrolik ve nötronik analizleri yapılmıştır [9].
2015	Nematolahi	VVER-1000 reaktöründe acil çekirdek soğutma sisteminde sıcak çekirdeğin sıcaklığını düşürmek ve çekirdeğin erimesini önlemek amacıyla soğutucu olarak uygun bir nano akışkanın seçilmesi üzerine çalışılmıştır [16].
2015	Mousavizadeh	CFD kodu kullanılarak su- TiO_2 nano akışkanının ısı transferine etkileri araştırılmıştır [17].
2016	Ebrahimian & Ansarifar	VVER-1000 nükleer reaktöründe soğutucu olarak nano akışkan seçilmesinin termal hidrolik etkileri CFD kodu kullanılarak araştırılmıştır [10].
2016a	Ghazanfari	VVER-1000 reaktörü için soğutma sıvısı olarak nano akışkanların (Al_2O_3 , TiO_2 ve CuO) katı ve dairesel şeklindeki yakıtlar üzerindeki etkisi analiz edilmiştir [11].
2016b	Ghazanfari	VVER-1000 reaktöründe soğutucuya eklenen nanoparçacığın (su - Al_2O_3) katı ve dairesel yakıtlar üzerindeki termal hidrolik analizi gerçekleştirilmiştir [12].

Çizelge 2.1. (devam) Reaktörlerde nano akışkan etkisini gözlemleyen çalışmalar

2017	Ghahdarijani	Nano akışkanın reaktörün soğutma performansına ve basınç düşüşüne etkileri deneysel olarak araştırılmıştır [18].
2018	Saadati	Bir hafif su nükleer reaktörünün ilk çalışma döngüsü sırasında hem soğutucu olarak hem de reaktivitenin kontrolü için su / gümüş nano akışkanın seçilmesinin etkileri araştırılmıştır [13].
2019	Kianpour & Ansarifar	VVER-1000 reaktöründe soğutucu akışkan olarak nano akışkanın kullanılmasının termal reaktivite geri besleme katsayılarına etkileri termal hidrolik ve nötronik analiz kullanılarak değerlendirilmiştir [14].
2019	Nourollahi	Sıfır mertebeden ortalama akım düğüm genişletme yöntemi ile soğutucu olarak Al_2O_3 nano akışkan içeren bir VVER-1000 reaktörünün nötronik analizi WIMS-D5 kodu kullanılarak yapılmıştır [19].
2021	Uzun	Baz sıvı olarak seçilen su ile farklı oranlarda Al_2O_3 içeren soğutucu akışkanın bir VVER-1000 reaktörü üzerindeki termal etkisi incelenmiştir [15].

3. NÜKLEER REAKTÖRLER

Nükleer reaktörler, nükleer enerjiyi elektrik enerjisine çeviren sistemlerdir. Reaktörlerde nükleer enerjiden elde edilen yüksek ısı, türbinler ve jeneratörler yardımıyla elektrik enerjisine dönüştürülmektedir. Nükleer enerjinin tarihi İtalyan bilim adamı Enrico Fermi'nin, 1934 yılında nötronların atomları parçalayabileceğini keşfetmesi ve yaptığı deneyler sonucunda uranyumun nötronlarla bombardımanından uranyumdan daha hafif atomlar bulmasına dayanmaktadır. Uranyum ötesi elementlerin keşfi ona 1938 yılında Nobel ödülü kazandırmıştır.

Bu bölümde öncelikle fisyon ve füzyon tanımlarına değinilmesinde fayda olduğu düşünülerek nükleer enerjinin temelini oluşturan bu iki terimden kısaca bahsedilmektedir. Ağır ve kararsız yapıdaki (U^{233} , U^{235} , Pu^{239} gibi) radyoaktif çekirdeklerin nötron veya foton gibi düşük enerjili bir parçacığı yakalamasıyla iki hafif çekirdek oluşturması olayına fisyon denilmektedir. Fisyon reaksiyonu sonucunda, oluşan iki fisyon ürününün yanı sıra 2-3 nötron ve yüksek miktarda (~ 200 MeV) enerji açığa çıkmaktadır. Bu meydana gelen nötronlar yeni bölünmeler için temel hazırlamakta ve böylece fisyon olayı zincirleme olarak kendiliğinden devam etmektedir. Füzyon ise çekirdek bölünmesinin (fisyon) tersine, hafif iki çekirdeğin birleşerek kararlı hale gelmesidir. Füzyon ürünü çekirdeğin kütlesi, başlangıçtaki çekirdeklerin durgun kütlelerinin toplamından daha küçüktür ve aradaki bu kütle kaybı enerji olarak reaksiyonun sonucu açığa çıkmaktadır [20]. Füzyon reaksiyonları sonucunda açığa çıkan enerji, fisyon ile karşılaştırıldığında çok daha fazladır. Ayrıca hafif çekirdeklerin bol bulunmaları, kolay ve ucuz elde edilmeleri füzyondan enerji üretimini daha avantajlı hale getirmektedir. Ancak tüm bunların yanı sıra füzyonun en önemli dezavantajı, çekirdeklerin birleşebilmeleri için Coloumb kuvvetini aşacak yüksek enerjiye ihtiyaç duymasıdır. Bu da günümüzce yalnızca ticari olarak fisyon reaktörlerinin kullanılmasının sebeplerinden en önemlileri arasında yer almaktadır.

Günümüzde 422 adet çalışır durumdaki ticari reaktörlerin hepsi enerjisini fisyon reaksiyonlarından elde etmektedir [4]. Çalışır durumdaki reaktörlerin toplam net kapasitesi 378 314 MW'dır. Dünya üzerinde ticari olarak kullanılan reaktörlerin tiplerine göre dağılımı Çizelge 3.1'de gösterilmektedir. Füzyon reaktörleri ise henüz ticari olarak kullanılmaktadır. Kurulum aşamasında olan Basınçlı Su Reaktörlerinden biri ülkemizde kurulumuna devam

edilmekte olan VVER-1200 tipi reaktördür.

Çizelge 3.1. Dünya’da nükleer reaktörlerin durumu [4]

Reaktör Tipi	Çalışır Durumdaki Reaktör Sayısı	Kurulum Aşamasındaki Reaktör Sayısı	Kapatılmış Reaktör Sayısı
PWR	303	49	65
BWR	49	2	52
PHWR	47	3	10
LWGR	11	-	13
GCR	8	-	44
FBR	3	3	8
HTGR	1	-	4
HWGCR	-	-	3
HWLWR	-	-	2
SGHWR	-	-	1
Diğer	-	-	2
Toplam	422	57	204

Nükleer reaktörler yıllar boyunca birçok farklı tasarımla enerji üretimi gerçekleştirmektedir. Farklı tasarıma sahip olsalar da nükleer reaktörlerin temel bileşenleri aynıdır. Bu bileşenler yakıt, soğutucu, moderatör, kontrol çubukları ve diğer yardımcı sistemler olarak sınıflandırılabilir. Günümüzde nükleer reaktörlerin % 83’ünü hafif su reaktörleri oluşturmaktadır. Hafif su reaktörlerinde yakıt olarak %3-%5 oranında zenginleştirilmiş UO_2 kullanılmaktadır. Enerjinin kaynağı olan zenginleştirilmiş UO_2 önce seramik yapıda peletler haline getirilmekte, sonrasında metal çubuklara yerleştirilmektedir. Bu çubuklar kare prizma oluşturacak şekilde birleştirildikten sonra nötronik analizlere uygun olarak dizilerek yakıt demetlerini meydana getirmektedir. Yakıt çubuklarının arasında geçerek fisyon sonucu açığa çıkan yüksek ısıyı çekme işlemi de reaktörde kullanılan soğutucu ile sağlanmaktadır. En yaygın kullanılan soğutucu sudur. Nükleer reaktörlerin soğutucu ihtiyacının rahatça karşılanabilmesi amacıyla suya yakın bölgeleri kurulması tercih edilmektedir. Suya göre daha pahalı bir çözüm olan ağır su (D_2O) da reaktörlerde kullanılmaktadır. Alternatif olarak gaz soğutmasının tercih edildiği reaktörler de kullanımdadır. Fisyon sonucu meydana gelen nötronların yavaşlatılması amacıyla da yine en yaygın kullanılan moderatör sudur ve ona alternatif olarak ağır su, grafit gibi materyaller de kullanılabilir. Bir diğer reaktör komponenti olan kontrol çubukları, nötron emici özelliğe sahip kadmiyum, bor, hafniyum,

indiyum, gibi malzemelerden yapılmakta ve fisyon reaksiyonlarının kontrolünü sağlamak amacıyla çekirdeğe yerleştirilmektedir. Tüm bu sistemlerin düzenli çalışması, kontrolü, sistem güvenliği için reaktörde yer alan diğer bileşenler de diğer yardımcı bileşenler olarak sınıflandırılmaktadır. Farklı türde yakıt, soğutucu ve yavaşlatıcı kullanılan reaktörlerin temel özelliklerini Çizelge 3.2’de gösterilmektedir.

Çizelge 3.2. Reaktör türüne göre özellikler

	Yakıt	Soğutucu	Yavaşlatıcı
PWR	Zenginleştirilmiş UO_2 (%2-%5)	Su	Su
BWR	Zenginleştirilmiş UO_2 (~%3)	Su	Su
VVER	Zenginleştirilmiş UO_2	Su	Su
CANDU	Doğal UO_2	Ağır su	Ağır su
LWGR	Doğal UO_2	Su	Grafit
GCR	Doğal UO_2	Karbondiyoksit veya Helyum	Grafit veya Berilyum
FBR	PuO_2 ve UO_2	Sıvı Metal (Sodyum)	Yok

3.1. Hafif Su Reaktörleri (Light Water Reactor – LWR)

Dünya üzerinde elektrik üretmek amacıyla kullanılan en yaygın reaktör çeşididir. Bu reaktörlerde soğutucu ve yavaşlatıcı olarak hafif su kullanılmaktadır. Hafif su düşük maliyetli, kolay ulaşılabilir ve termodinamik özellikleri iyi bilinen mükemmel bir yavaşlatıcıdır. Bu tip reaktörler de yakıt olarak zenginleştirilmiş uranyum kullanılmaktadır. Günümüzde hafif su reaktörleri, basınçlı su reaktörleri ve kaynar su reaktörleri olmak üzere iki ana kategoride sınıflandırılmaktadır.

3.1.1. Basınçlı su reaktörleri (PWR – Pressurized Water Reactor)

Basınçlı su reaktörleri dünyada elektrik elde etmek amacıyla kullanılan en yaygın ticari reaktörlerdir. İlk olarak “Westinghouse Bettis Atom Enerjisi Laboratuvarında” Amerikan donanmasının nükleer denizaltı yapımında kullanılması için tasarlanmıştır. İlk nükleer denizaltı olan Nautilus 1954 yılında denize indirilmiştir. Denizaltındaki başarısından sonra bu reaktörlerin elektrik üretiminde de kullanılabileceği düşünülerek çalışmalar başlatılmıştır ve 1957 yılında 68 MW gücündeki “Shippingport Reaktörü” dünyada ticari olarak elektrik

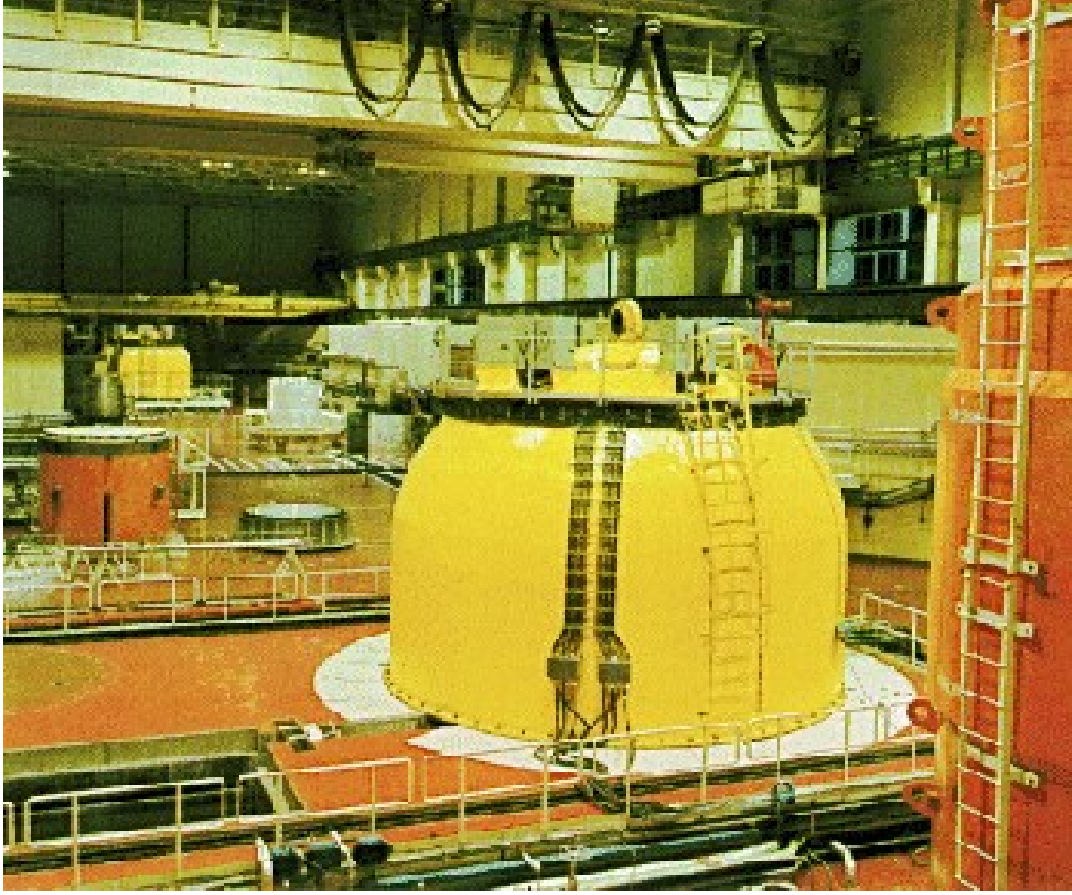
üretimi yapılan ilk reaktör olarak işletmeye alınmıştır. Basınçlı Su Reaktörünün öncüsü olan ABD günümüzde en fazla nükleer reaktöre sahip ülkedir ve çalışır durumdaki 92 ticari reaktöründen 61'i basınçlı su reaktörüdür.

Basınçlı Su Reaktörlerinde soğutucu ve moderatör olarak hafif su kullanılmaktadır. Bu tip reaktörlerde buharlaşma olmadan soğutucunun görevini yapabilmesi için yüksek basınçta (yaklaşık 15 MPa) tutulması sağlanmaktadır. Basınç kabına 290°C'de giren su, reaktör kabını 325°C'de terk eder, herhangi bir kaynama olayına rastlanmaz. Bu tip reaktörlerde su reaktörün içerisinde kaynamadığından türbinlerin ihtiyaç duydukları buhar "buhar üretici" adı verilen komponentte üretilmektedir. Basınçlı su reaktörlerinde termal verim %32 ile 33 arasındadır. Yakıt olarak ise %2-5 aralığında zenginleştirilmiş UO₂ kullanılmaktadır.

3.1.2. Rus tipi basınçlı su reaktörleri (Voda-Vodyanoi Energetichesky Reaktor VVER)

VVER tipi reaktörlerin tarihi 1970 yılına dayanmaktadır. Bu yıllarda eski Sovyetler Birliği tarafından tasarlanan reaktörlerin yapımı günümüzde Rusya Federasyonu tarafından sürdürülmektedir. VVER; "Voda-Vodyanoi Energetichesky Reaktor" ifadesinin kısaltması olarak literatürdeki yerini almış olup anlamı su ile soğutulan-su ile yavaşlatılan enerji reaktörüdür.

Günümüze kadar VVER'ler için 4 nesil geliştirilmiştir. 1. Nesil olarak tanımlanan VVER'ler VVER-440/230 modelleridir. Bu model 1960'larda ticari olarak kullanılmaya başlanmıştır. Resim 3.1'de ilk VVER tasarımı olan Novovoronezh 1'e yer verilmiştir. Rusya'da kurulan Novovoronezh nükleer santralının ilk üniteleri VVER-210 ve VVER-365 modellerinin tasarım özelliklerine sahiptir. İlk kurulan bu VVER ünitelerinin ömrü yaklaşık 20 yıl olmuş ve sonrasında kapatılmıştır. Bu sebeple bu ünitelere prototip gözüyle bakılmaktadır. Birinci nesil VVER'lerin en önemli özelliği koruma kabının olmamasıdır. Koruma kabının olmamasının yanı sıra yangından koruma sistemi, kontrol odasının korunma standartları ve diğer güvenlik standartlarının düşük olması da bu reaktörlerin güvenlik zafiyetleri arasında sayılabilir.



Resim 3.1. İlk VVER tasarımı - Novovoronezh 1 [21]

2. Nesil olarak tanımlanan VVER-440/213'e geçildiğinde bir önceki modeldeki birçok güvenlik açığı kapatılmıştır. 3. Nesil reaktörler, VVER-1000 reaktörleridir. Bu model ile VVER'lere, PWR özelliklerine benzer yeni özellikler kazandırılmıştır. 4. Nesil olarak tanımlanan VVER-1200'ler ise "Uluslararası Atom Enerjisi Ajansı"'nın standartlarına uygun hale getirilmiş Rus tipi reaktörlerdir. Ülkemiz ile Rusya arasında Mersin'de 4 üniteli VVER-1200 kurulması yönünde 2010 yılında anlaşma imzalanmıştır. Toplam kurulu gücü 4.800 MW olan 4 üniteli Akkuyu Nükleer Güç Santralini (Resim 3.2) yılda 35 milyar kWh elektrik üretmesi ve Türkiye'nin elektrik ihtiyacının yaklaşık %10'unu karşılaması beklenmektedir. Akkuyu Nükleer Güç Santralini tahmini hizmet ömrü 60 yıl olmakla birlikte 20 yıl kadar uzatılabileceği öngörülmektedir [22]. VVER'lerin nesillerine göre gelişim durumları Çizelge 3.3'de gösterilmektedir.



Resim 3.2. VVER-1200 Akkuyu Nükleer Güç Santrali İnşaatı [22]

Çizelge 3.3. VVER reaktörlerinin özellikleri

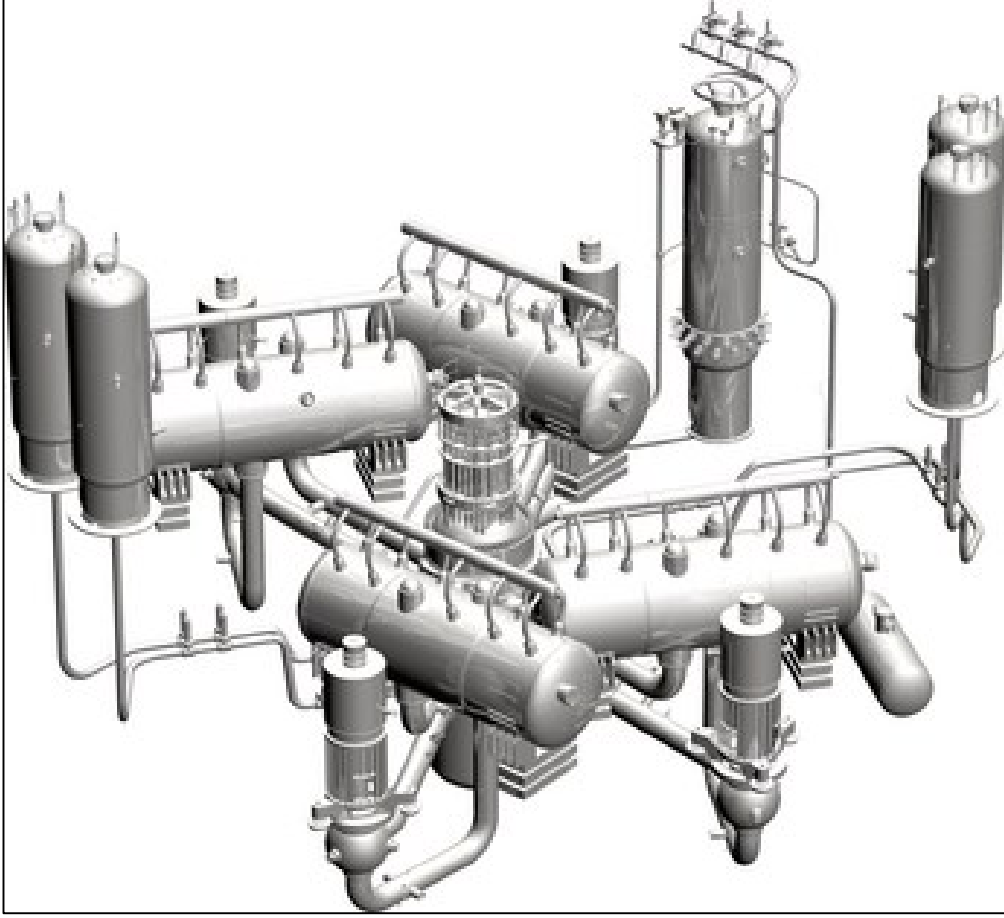
1. NESİL	VVER-440/230	Koruma kabı bulunmamaktadır.
		Acil Durum Çekirdek Soğutma Sistemi (Emergency Core Cooling System – ECCS) yoktur.
		Reaktör kabının iç çeperindeki paslanmaz çelik zarf eksikliği söz konusudur.
		Yangından koruma sistemi, kontrol odasının koruma standartları ve diğer güvenlik standartları düşüktür.
		6 adet birincil soğutma sıvısı döngüsü mevcuttur. Bu da yüksek soğutma sıvısı envaneri, daha kolay soğutma avantajı sağlamaktadır.
		Yatay buhar üreticileri sayesinde daha iyi ısı aktarımı sağlanmaktadır.
2. NESİL	VVER-440/213	1 veya daha fazla buhar üreticinin bakımı reaktörün çalışması sırasında yapılabilmektedir.
		Bağımsız kontrol ve düzenleyici denetim eksikliği mevcuttur.
		Reaktör binasının sızdırmazlığı yeterli seviyede değildir.

Çizelge 3.3. (devam) VVER reaktörlerinin özellikleri

		Prosedürlerin ve güvenlik şartlarının aynı model reaktör için ülkelere göre değişkenlik göstermesi, işletim açısından problemlere sebep olmaktadır.
		Tasarım, üretim ve işletmede dokümantasyon eksiklikleri belirsizlikler ortaya çıkmıştır.
		6 adet birincil soğutma sıvısı döngüsü mevcuttur. Bu da yüksek soğutma sıvısı envanteri, daha kolay soğutma avantajı sağlamaktadır.
		Acil Durum Çekirdek Soğutma Sistemi (Emergency Core Cooling System – ECCS) ve ikincil besleme suyu sistemi eklenmiştir.
		Reaktörün koruma kabının iç çeperi paslanmaz çelikle kaplanmıştır.
3. NESİL	VVER-1000	Büyük bir reaktör koruma kabı yapılmıştır.
		Yangından koruma sistemlerinde önceki modellere göre iyileştirme sağlanamamıştır.
		İşletme ve acil durum prosedürleri eksik düzenlenmiş ve ülkeden ülkeye farklılık göstermektedir.
		Diğer reaktörlere göre güvenlik ve kontrol sistemleri düşük seviyededir.
		4 adet yatay buhar üretici kullanılmaktadır.
		Daha iyi soğutucu akışı sağlamak amacıyla yakıt demetleri yeniden tasarlanmıştır.
		Kontrol çubuklarının dizaynı iyileştirilmiştir.
4. NESİL	VVER-1200	60 yıl hizmet ömrü vardır.
		Yüksek kapasite faktöre ve termal verimliliğe sahiptir.
		Kaza sırasında acil ve güvenli kapatma sistemleri mevcuttur.
		Uluslararası Atom Enerjisi Ajansı standartlarına uygun prosedürler kullanılmaktadır.

Bu çalışmada 3. nesil bir reaktör olan VVER-1000 reaktörü özelinde çalışmalar gerçekleştirilmiştir. VVER-1000 reaktörleri 1975-1985 yılları arasında tasarlanmıştır. Bu reaktörün gelişimi sırasında 2 farklı versiyon üzerinde çalışılmış olup bunlara VVER-91 ve VVER-92 isimleri verilmiştir. VVER-91 reaktörü Sovyetler Birliği ile Finlandiya'nın ortaklığında tasarlanmıştır. VVER-92 reaktörleri ise batıdaki devletlerin desteğiyle oluşturulmuş bir tasarım olarak literatürdeki yerini almıştır [3]. VVER-1000 reaktörleri basınçlı su reaktörü sınıfında yer almakla birlikte tipik batı tasarımlı PWR'lardan farklılıkları bulunmaktadır. Tipik bir VVER'in PWR'lardan en büyük farkı altıgen yakıt

demeti tasarımı, kor geometrisi ve yatay şekilde konumlanmış buhar üreteçleridir (Resim 3.3) [23, 24].



Resim 3.3. Yatay VVER buhar üreteçleri

Geçmiş tasarımlarıyla karşılaştırıldığında ise batıdaki örneklerine benzer olarak dizayn edilmiş çelik kaplamalı daha büyük bir koruma kabı tasarlanmıştır. Bir önceki modelleriyle kıyaslandığında daha yüksek düzeyde güvenlik önlemleri alınmaya başlanmıştır. Yakıt demetlerinde, soğutucu akışını iyileştirmek için çalışmalar yapılmış, kontrol çubuklarının tasarımında geliştirmeler yapılmıştır.

Tüm bu gelişmelerin yanı sıra VVER-1000 reaktörlerinde gelişime açık yönler bulunmaktadır. Bunlar arasında, ne kadar geçmiş tasarımlara göre gelişme kaydedilmiş olsa da, güvenlik faktörleri yer almaktadır. Ayrıca diğer VVER'lerde de görülen modelden modele farklılık gösteren tasarım ve inşa standartları da bu reaktörlerin Dünya çapında tercih edilmesini ve standartlaşmasını engellemektedir. Çizelge 3.4'te tipik bir VVER-1000 reaktörünün tasarım özellikleri listelenmiştir.

Çizelge 3.4. VVER-1000'lerin genel özellikleri [15, 25]

Termal güç	3 000 MWt
Basınç	15,7 MPa
Yakıt	UO ₂
Moderatör	H ₂ O
Soğutucu	H ₂ O
Yakıt çubuğu sayısı	312
Yakıt demeti şekli	Altıgen
Yakıt demeti sayısı	163
Giriş entalpisi (kJ/kg)	1290
Kor girişinde soğutucu sıcaklığı (K)	575
Demetler arasındaki mesafe	23,6
Pelet çapları arasındaki mesafe	1,5 mm
Pelet dış çapı	7,57mm
Zarf dış çapı	9,2 mm
Zarf malzemesi	Alaşım Zr + % 1 Nb

3.1.3. Kaynar su reaktörleri (Boiling Water Reactor – BWR)

Hafif Su Reaktörlerinden bir diğeri ise Dünya’da PWR’lardan sonra en çok kullanılan nükleer reaktör çeşidi olan Kaynar Su Reaktörleridir. Basınçlı Su Reaktörlerine benzer olarak yavaşlatıcı ve soğutucu olarak su kullanılmaktadır. Bu reaktörün tasarım sürecinde soğutucunun kaynamasının güvenlik riski oluşturabileceği değerlendirilmiş, nitekim yapılan deneyler de düşük basınçta kaynayan suyun reaktör güvenliği açısından tehlike arz ettiğini doğrulamıştır. Ancak ilerleyen süreçlerde yapılan araştırmalar sonucunda yüksek basınçta kaynayan suyun reaktörde kullanılmasında bir sakınca olmadığı, reaktörün kontrol edilebilir durumda olduğu gözlemlenmiştir. Bu gelişmeler ışığında BWR’lar ticari olarak elektrik üretiminde tercih edilen bir seçenek olarak günümüze gelmiştir. Basınçlı Su Reaktörlerinden

temel farkı reaktör korunda kaynama olayının gerçekleşmesidir ve bu durum sayesinde buhar üreteçlerine ihtiyaç kalmamaktadır.

Kaynar Su Reaktörlerinde soğutucu ve moderatör olarak hafif su kullanılmaktadır. Bu tip reaktörlerde ihtiyaç duyulan basınç PWR'ların yarısı kadardır (yaklaşık 7 MPa). Bir kaynar su reaktörünün termal verimi %33 ile 34 arasındadır. Yakıt olarak ise ~%3 aralığında zenginleştirilmiş UO_2 kullanılmaktadır.



Resim 3.4. Bir BWR santral sahası – Enrica Fermi Nükleer Santrali [26]

3.2. Ağır Su Reaktörleri (Heavy Water Reactor)

PWR reaktör tipine benzer özellikleri olan bu reaktörler soğutucu ve yavaşlatıcı olarak ağır su (D_2O) kullanılmasıyla diğer reaktörlerden ayırt edilir. Kanada yapımı bu reaktörlerde doğal uranyum rezervlerinin kullanılabilir olmasının avantajları keşfedilmiştir. Kanada'nın araştırmalarında öncülük yaptığı bu reaktör CANDU (Canadian Doterium Uranium) adıyla da bilinmektedir.

Bu reaktörleri diğerlerinden ayıran en önemli tasarım özelliği reaktör kabının yatay konumlandırılmasıdır. Yakıt olarak doğal uranyum kullanılması da pahalı olan zenginleştirme işlemine ihtiyaç duyulmadığından ekonomik olarak tercih sebebidir. Ayrıca CANDU'ların en önemli özelliklerinden birisi de işletme halindeyken reaktöre yeni yakıt yüklemesinin yapılabilmesidir.



Resim 3.5. Bir PHWR santral sahası – Bruce Nükleer Santrali [27]

3.3. Gaz Soğutmalı Reaktörler (Gas Cooled Reactor – GCR)

Gaz soğutmalı reaktörlerin inşasına askeri amaçlarla plütonyum üretilmesi için başlanmıştır. İngiltere, Fransa, Amerika Birleşik Devletleri, Almanya, Çin gibi birçok ülke gaz soğutmalı reaktörlere ilgi göstermiştir. Günümüzde de halen daha İngiltere'nin çalışır durumda gaz soğutmalı reaktörlerinin bulunması bu ilgisinin kanıtı niteliğindedir. Bu reaktörlerde yakıt olarak doğal uranyum, yavaşlatıcı olarak grafit, soğutucu gaz olarak ise CO₂ kullanılmaktadır.



Resim 3.6. Bir GCR santral sahası [28]

4. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu çalışmada, % 3,7 zenginleştirilmiş uranyum dioksit (UO_2) nükleer yakıtlı VVER-1000 nükleer reaktöründe hibrit nanoparçacıklı soğutucu akışkanlar kullanılarak reaktörün termal hidrolik analizi incelenmiştir. Nükleer reaktörlerde termal analizlerde korda meydana gelen termal (sıcaklık, yoğunluk, entalpi gibi) fiziksel özellikler oldukça önemlidir. Hesaplamalarda reaktör koru homojen olarak ele alınmış ve termal hidrolik analizi COBRA-IV PC kodu ile yapılmıştır.

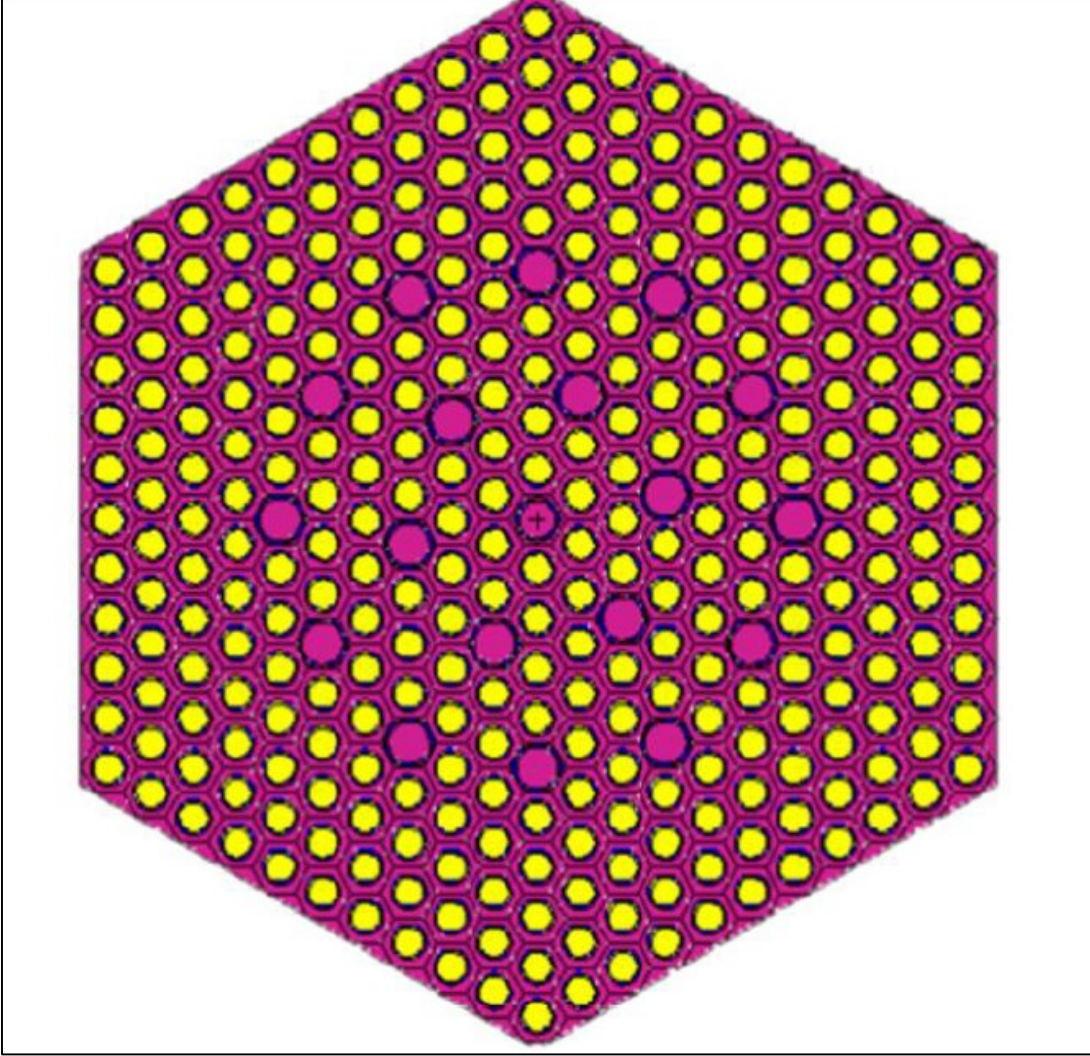
Hesaplamalarda esas alınan VVER-1000 reaktörünün karakteristik özellikleri Çizelge 4.1’de verilmiştir [13].

Çizelge 4.1. Reaktör özellikleri

Parametre	Değer
Reaktör termal gücü	3 000 MWt
Reaktör basıncı	15,7 MPa
Yakıt	UO_2
Yakıt Zenginliği	% 3,7
Yakıt demeti şekli	Altıgen
Yakıt Demeti Sayısı	163
Kor girişinde soğutucu sıcaklığı	575 K
Kor Eşdeğer Çapı	3,16 m
Kanal Uzunluğu	3,55 m

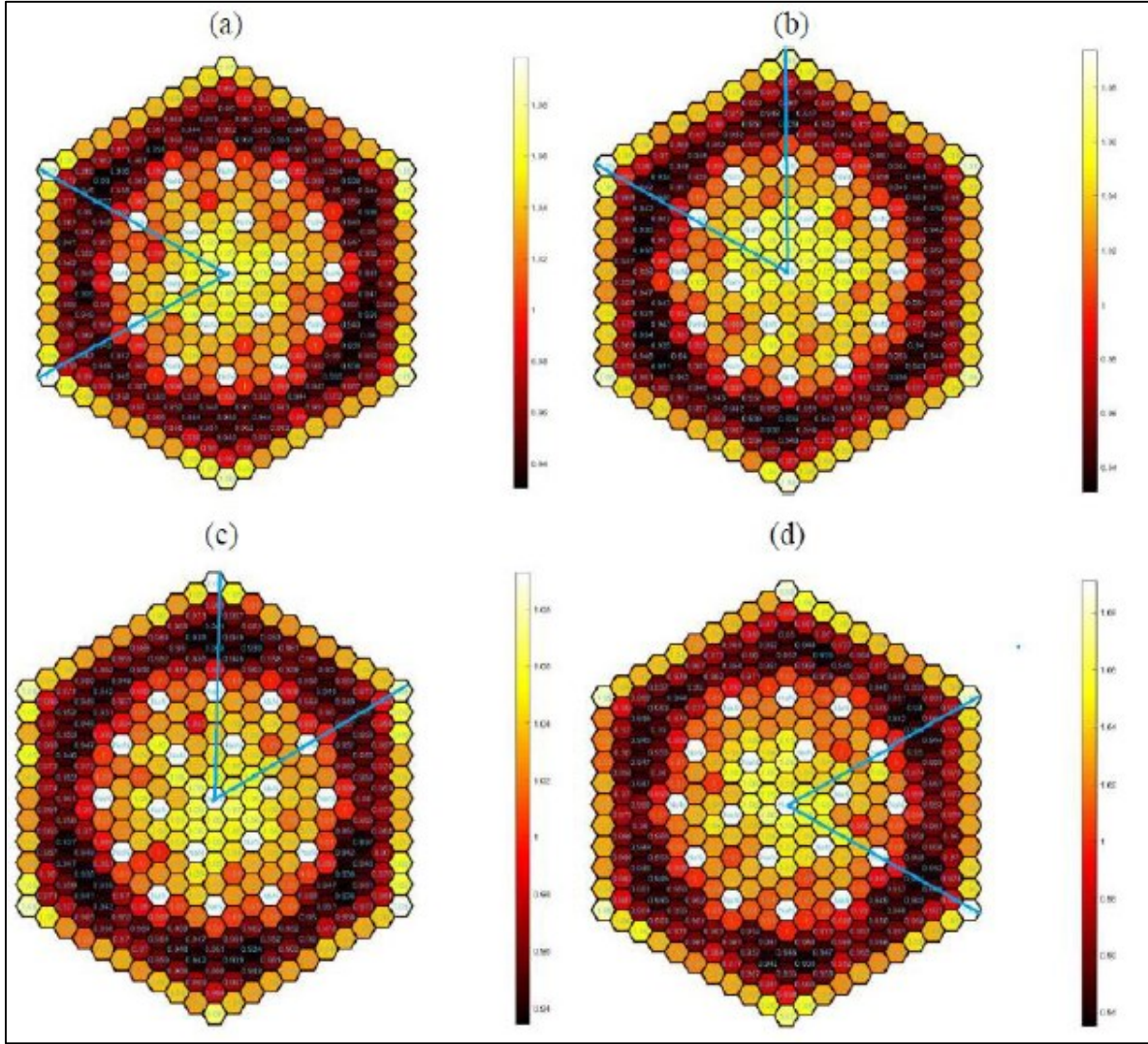
Bu tez çalışmasında Çizelge 4.1’de özellikleri belirtilen reaktöre göre termal hidrolik analizler yapılmıştır. COBRA – IV ile yapılan termal analizler, MCNP kodu ile yakıt demetlerinin yoğunluk dağılımları ve kritiklik değerleri elde edildikten sonra gerçekleştirilmektedir. MCNP girdilerine göre elde edilen kor modeli örneği Şekil 4.1’de

gösterilmektedir. Bu örnekteki nötronik hesaplamalarda yakıt sıcaklığı 1027 K iken yakıt dışı tüm bileşenlerin sıcaklığı 575 K olarak kabul edilmiştir. [29].



Şekil 4.1. MCNP kodu ile modellenmiş kor [29]

Literatür araştırması yapılırken bir çok çalışmada farklı nanoparçacıkların eklendiği soğutucular için nötronik analizler yapıldığı gözlemlenmiştir. MCNP kodu kullanılarak yapılmış %3,7 zenginlikte UO_2 yakıtlı VVER-1000 reaktörü için bağıl güç dağılımına göre Al_2O_3 nano akışkanının farklı hacimlerdeki kor modeli değişimleri Şekil 4.2’de gösterilmektedir [29].



Şekil 4.2. a) % 0,01, b) % 0,05, c) % 0,1, d) % 0,2 hacimli Al₂O₃ nanoparçacıklı soğutucu eklenmiş reaktörün MCNP kor modeli [29]

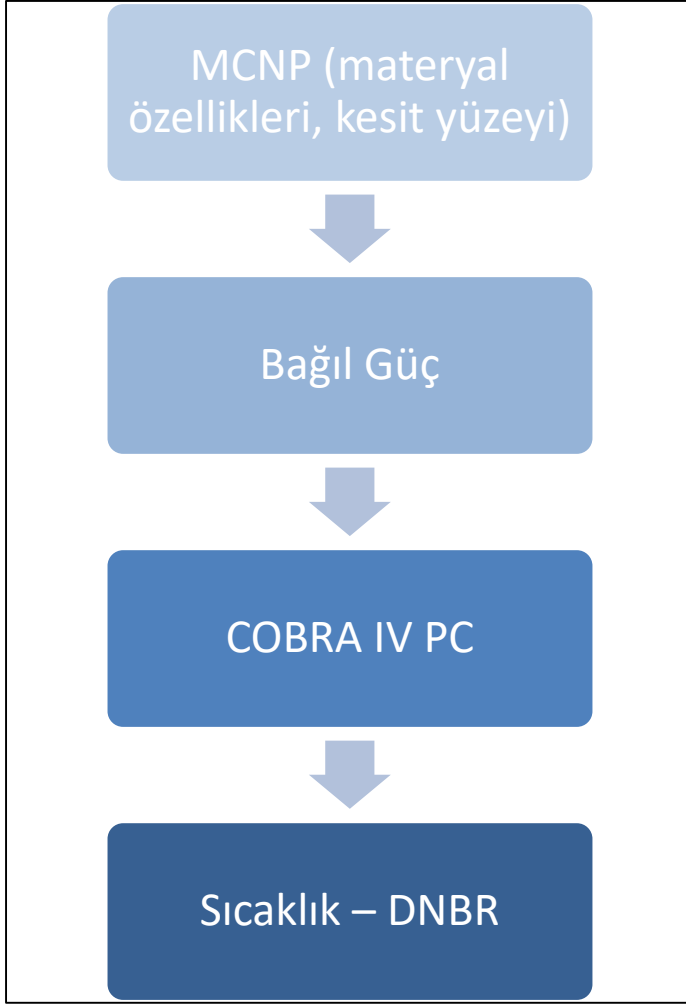
4.1. COBRA IV Kodu

Nükleer reaktörlerin güvenli bir şekilde işletilebilmesi için reaktörün belirli koşullarda nasıl çalışacağını, nasıl bir davranış sergileyeceğinin bilinmesi gerekmektedir. Güvenli çalışmanın sağlanması için reaktörde her çeşit nötronik ve termal hidrolik analiz yapılmaktadır. Standart koşullarda çalışmasını sürdüren bir reaktörde tüm nötronik ve termal parametreler düzgün görünse de yaratacağı büyük etki düşünüldüğünde kaza senaryoları için de analizlerin gerçekleştirilmesi şarttır. Tüm bu hesaplamaların yapılabilmesi için birçok kod kullanılmaktadır. COBRA-IV kodu da bu amaçla yazılmış kodlardan biridir. COBRA-IV-I kodunun ilk geliştirildiği 1970'lerin ortalarında, bilgisayar donanımı ve donanım kaynaklarını yöneten yazılım olan işletim sistemi (OS) üzerindeki sınırlamalar nedeniyle

yazılımın geliştirilmesinde birçok zorluk yaşanmıştır. Günümüzde ise gelinen noktada bilgisayar donanımının ve işletim sisteminin hızlı bir şekilde geliştirilmesi, yazılımın geliştirilmesinin önündeki engelleri oldukça azaltmıştır [30]. Bu kodda kanallar arasındaki çapraz kütle akışının tespiti için Gauss-Seidel iterasyon yöntemi kullanılır [31].

COBRA (Coolant Boiling in Rod Arrays), Hafif Sulu Reaktörler için geliştirilmiş iki akışkan ve üç alan (akışkan katman, akışkan damla ve buhar) modelleme yaklaşımı kullanan bir termal hidrolik simülasyon kodudur. COBRA kodu ile hem alt-kanal analizleri hem de 3 boyutlu kartezyen formunda dokuz korunum denklemini çözülebilmesi mümkündür. Bu termal hidrolik simülasyon kodu Pasific Northwest Laboratory tarafından 1980'li yıllarda geliştirilmiştir. COBRA, farklı fazlar için ayrı ayrı kütle korunum denklemi çözmektedir. Buhar, sıvı ve sıvı-buhar akışkan için x, y ve z kartezyen koordinatlarında momentum korunum denklemi çözülebilmektedir. Bu kod yardımıyla reaktör korundaki yakıt kanallarında bulunan soğutucularda, kanal boyunca gerçekleşen basınç düşmesi, kütle akı değişimi, entalpi değişimi ve yakıt çubuklarında oluşan sıcaklık değerleri hesaplanabilmektedir. Reaktör korunda bulunan yakıt kanallarındaki akışkandaki değişkenlik gösteren termo-fiziksel karakteristikler kütle korunumu, enerjinin korunumu ve momentumun korunumu yardımıyla sürekli rejimde veya zamana bağlı olarak hesaplamalar elde edilir.

COBRA IV kodundan, MCNP kodu sonucunda yakıt demetlerinin yoğunluk dağılımları ve kritiklik değerleri elde edildikten sonra termal analizlerin yapılması noktasında yararlanılmaktadır. Resim 4.2'de nötronik analizler ile termal analizler arasındaki bağlantısallık gösterilmektedir.



Resim 4.2. Nötronik ve termohidrolik analizler arasındaki ilişki [32]

Bir akış alanındaki kütle, momentum ve enerji korunum denklemlerinin diferansiyel formları sırasıyla aşağıda verilmiştir [32, 33]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \quad (4.1)$$

Denk. (4.1), v ifadesi soğutma sıvısının hızını ve ρ sıvı yoğunluğunu temsil eder.

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho h + (\rho h \vec{v}) = -\nabla q'' + q''' + \frac{\partial p}{\partial t} + \nabla \cdot (p \vec{v}) + \tau \quad (4.2)$$

Denk. (4.2), h entalpi değeri, q'' ısı akısı, q''' hacimsel ısı kaynağı ve τ kayma gerilimidir.

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho \vec{v} + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \tau + \rho g \quad (4.3)$$

Denk. (4.3), p sıvı basıncı, g yerçekimidir.

4.1. Nano Akışkanlar

Literatürdeki yerini 1995 yılında alan nano akışkanlar, genelde çapı 100 nanometreden az olan malzemelere denir. Günümüzde gelişen teknolojinin bir sonucu olarak birçok mühendislik çalışmasında ve uygulamasında yüksek ısı transferine ihtiyaç duyulmaktadır. Son dönemlerde oldukça popüler olan nanoteknoloji; tıp, sanayi, tekstil, mühendislik, ilaç sektörlerinde önemli yer tutar.

Nano akışkanların iki ana katmanı bulunmaktadır. Bunlardan biri baz akışkan, diğeri ise nanoparçacıktır. Baz akışkanın görevi nanoparçacıkların taşınmasını sağlamaktır. Yoğunluk, viskozite, ısı iletim katsayısı gibi birçok özellik baz sıvının seçiminde etkilidir. Yapılan çalışmalar incelendiğinde görülüyor ki en çok kullanılan baz sıvı sudur. Bunu sebebi suyun termofiziksel özelliklerinin yanı sıra erişiminin de kolay olmasıdır. Viskozitesi yüksek olan yağlar ise, pompa yükünü arttırdığından çok fazla tercih edilmemektedir. Her ne kadar yüksek viskozitesi sebebiyle yağ kullanımı olumsuz görünse de sistemlerdeki kullanım sırasında oluşan sürtünmeden kaynaklı sorunları azaltması da olumlu yanı olarak görülebilir. Kullanılan bir diğeri baz akışkan ise glikoz türevleridir. Farklı atomların hidroksile (OH) bağlanması sonucu oluşan bileşiklerdir. Etilen glikol, butil glikol vb. kullanılan birçok çeşidi bulunmaktadır.

Nano akışkan içerisinde yer alan diğeri bir bileşen ise nanoparçacıklardır. Birçok çeşidi olan nanoparçacık; seramik, yarı iletken, polimerik, metal türlerinde olabilmektedir. Nano akışkan üretiminde en yaygın kullanılan nanoparçacıklar ise Al_2O_3 , SiC, CuO, SiO_2 , TiO_2 , Fe_2O_3 gibi türlerdir [34].

Bahsedildiği üzere termal iyileştirmelerde ısı transfer sıvılarının iyileştirilmesinde nano akışkanlar ön plana çıkmaktadır. Nano akışkanlar, ortalama boyutları 100 nm'nin altında olan nanoparçacıkların su, yağ, dizel, etilen glikol vb. gibi akışkanlara eklenmesi ile tasarlanmışlardır. Bu eklemelerdeki asıl hedef nano akışkanların geleneksel sıvılara göre

daha yüksek termal iletkenliklere sahip olmasıdır [35]. Literatürde başta alümina-su, CuO-su, TiO₂-su olmak üzere Ag (gümüş), Cu (bakır), Si (silisyum), Ti (titanyum), Zr (zirkonyum) gibi birçok nano akışkan tipleri ile karşılaşılabilir. Birçok deneysel ve sayısal çalışmalara yansımaktadır [36]. Bu tip nano akışkanlar nükleer reaktörlerde de soğutucu akışkanlara karıştırılarak ısı transferinin iyileştirilmesi hedeflenmiştir. Bu çalışmada kullanılan nanoparçacıkların termofiziksel özellikleri Çizelge 4.2’de verilmiştir.

Çizelge 4.2. Su ve nanoparçacıkların termofiziksel özellikleri [12, 37]

	C (J/kg K)	ρ (kg/m ³)	k (W/mK)
Su	4179	997,1	0,605
Al ₂ O ₃	765	3970	40
MgO	877	3580	60
ZnO	494	5500	23,4

Nanoparçacık içeren soğutucular kullanarak nükleer reaktörlerde termal hidrolik analizlerde, soğutucunun yoğunluk, viskozite, özgül ısı ve termal iletkenlik değerleri değişmektedir. Yoğunluk hesabı yapılırken Denk. 4.4’te belirtilen denklem kullanılır [15].

$$\rho_{nf} = (1 - \phi) \rho_f + \phi \rho_p \quad (4.4)$$

$$\frac{K_{nf}}{K_p} = 4.97\phi^2 + 2.72\phi + 1 \quad (4.5)$$

$$Cp_{nf} = (1 - \phi)Cp_f + \phi Cp_p \quad (4.6)$$

ϕ ifadesi, nanoparçacığın hacimsel oranını göstermektedir.

Hibrit nanoparçacık kullanımının ısı verim üzerindeki etkisi görülmek istendiğinden iki farklı nanoparçacık karışımı ele alınmıştır. Bu analizleri yapabilmek için hibrit nanoparçacıkların bazı termofiziksel özelliklerinin bilinmesi gerekmektedir. Nanoparçacıklar için yoğunluk ve özgül ısı kapasitesi hesaplamaları Denklem (4.7) ve (4.8)’daki gibidir [38].

$$\rho_{nf} = \Phi_b \rho_b + \Phi_a \rho_a + (1 - \Phi) \rho_{bf} \quad (4.7)$$

$$\rho_{nf} c_{nf} = \Phi_b \rho_b c_{p,b} + \Phi_a \rho_a c_{p,a} + (1 - \Phi) \rho_{bf} c_{p,bf} \quad (4.8)$$

Parçacık boyutu, hibrit nano akışkanın taşıma özelliklerini önemli ölçüde etkiler. Parçacık boyutunun farklı parametreler üzerindeki sonucunu göstermek için hibrit nano akışkanların termal iletkenliğini ve dinamik viskozitesini hesaplamak için Denklemler (4.9 - 4.12) kullanılır [39 - 41].

$$k_{nf} = \left[k_{bf} + \frac{r_{bf} \Phi_a k_a}{r_a (1 - \Phi)} + \frac{r_{bf} \Phi_b k_b}{r_b (1 - \Phi)} \right] \quad (4.9)$$

$$\mu_{nf} = (\mu_{nfa} \Phi_a + \mu_{nfb} \Phi_b) / \Phi \quad (4.10)$$

$$\frac{\mu_{nfa}}{\mu_{bf}} = \frac{1}{1 - 34.87 \left(\frac{r_{bf}}{r_a} \right)^{0.3} \Phi^{1.03}} \quad (4.11)$$

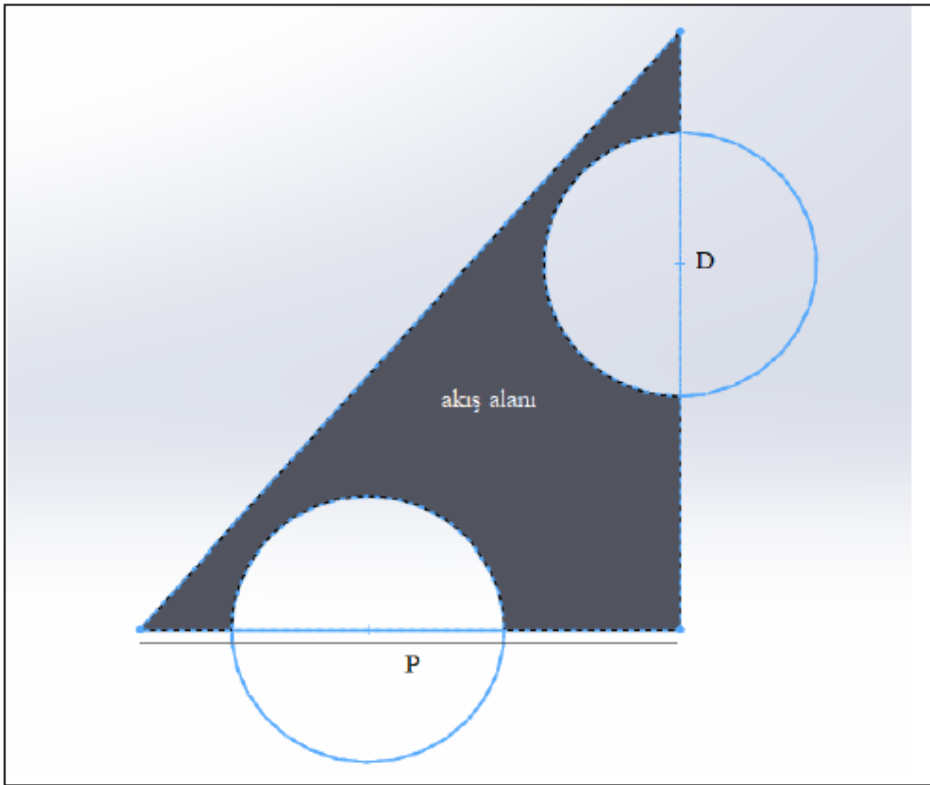
$$\frac{\mu_{nfb}}{\mu_{bf}} = \frac{1}{1 - 34.87 \left(\frac{r_{bf}}{r_b} \right)^{0.3} \Phi^{1.03}} \quad (4.12)$$

r = nm cinsinden yarıçap, Φ = nanoparçacık hacim fraksiyonu, μ = dinamik viskozite, k = termal iletkenlik, ρ = kütle yoğunluğu ve alt simgeler f = temel sıvı, a = birinci nanoparçacık ve b = ikinci nanoparçacıktır.

Hesaplamalarda hibrit nanoparçacıklı soğutucu akışkan yapılarının (% 0,1 Al₂O₃; % 0,1 Al₂O₃ + % 0,1 MgO; % 0,1 Al₂O₃ + % 0,2 MgO; % 0,1 Al₂O₃ + % 0,3 MgO; % 0,1 Al₂O₃ + % 0,1 ZnO; % 0,1 Al₂O₃ + % 0,2 ZnO; % 0,1 Al₂O₃ + % 0,3 ZnO) termal hidrolik analize etkisi incelenmiştir.

5. NÜMERİK SONUÇLAR

Bu tez çalışmasında % 3,7 zenginleştirilmiş uranyum dioksit (UO_2) nükleer yakıt kullanılarak VVER-1000 nükleer reaktöründe hibrit nanoparçacıklı soğutucu akışkanların termal hidrolik analize etkisi incelenmiştir. Yapılan hesaplamalarda Şekil 5.1’de gösterildiği gibi bir kanal boyunca akış alanı üzerinde analizler incelenmiştir. Hesaplamalar COBRA-IV PC termal hidrolik analiz kodu ile yapılmıştır. Hesaplamalarda hibrit nanoparçacıklı soğutucu akışkan; % 0,1 Al_2O_3 ; % 0,1 Al_2O_3 + % 0,1 MgO; % 0,1 Al_2O_3 + % 0,2 MgO; % 0,1 Al_2O_3 + % 0,3 MgO; % 0,1 Al_2O_3 + % 0,1 ZnO; % 0,1 Al_2O_3 + % 0,2 ZnO; % 0,1 Al_2O_3 + % 0,3 ZnO olarak düşünülmüştür. Yapılan bu çalışma ile kanal boyunca oluşan sıcaklık dağılımı, yoğunluk değişimi, entalpi ve çekirdek-akışkan kaynamasından ayrılma (DNBR-Departure from Nucleate Boiling) oranı incelenmiştir.



Şekil 5.1. Modellenen bir kanalın akış alanı gösterimi [29]

$$\text{Akış alanı} = \frac{P^2}{2} - \frac{\pi D_{\text{yakıtçubuğu}}^2}{4} \quad (5.1)$$

$$\text{Islanan çevre} = N_{\text{yakıtçubuğu}} \pi D_{\text{yakıtçubuğu}} = \pi D_{\text{yakıtçubuğu}}$$

$$\text{Isınan çevre} = N_{\text{yakıtçubuğu}} \pi D_{\text{yakıtçubuğu}} = \pi D_{\text{yakıtçubuğu}}$$

Eş. 5.1’de verilen ifadelerle, her bir kanal için akış alanı hesapları yapılmıştır. Nötronik sonuçlara bağlı olarak elde edilen bağıl güç yoğunluğu değerlerine göre reaktörün geometrik ve tasarım özellikleri ile birlikte hazırlanan COBRA IV PC termal hidrolik kodu koşulmuş, sonuçlar elde edilmiştir.

VVER 1000 nükleer reaktörlerinde kullanılan % 3,7 zenginlikte UO_2 nükleer yakıtla reaktör korunda fisyon reaksiyonları gerçekleşmektedir. Gerçekleşen bu fisyon reaksiyonlarına bağlı olarak ısı üretimi gerçekleşmekte ve bu ısı, soğutucu akışkanlar aracılığıyla ısı değiştiricilere gönderilmektedir. Çalışmanın başında gerçekleştirilen literatür taraması sırasında reaktör soğutucusuna belirli oranlarda eklenen nanoparçacıkların soğutucu özelliklerini iyileştirdiği gözlemlenmiştir. Bu bilgi ışığında, ısı kapasitesinin iyileştirilmesine yönelik olarak reaktör özgün soğutucusu olan su (H_2O) içerisine nanoparçacıklı soğutucu akışkanlar dahil edilmek suretiyle analizler gerçekleştirilmektedir. Çalışmada öncelikle %0,1 Al_2O_3 oranında nanoparçacık reaktör soğutucusu su ile karıştırılmış ve nanoparçacıkların etkisi karşılaştırılmıştır. Bir sonraki safhada ise hibrit nanoparçacıklar düşünülerek MgO ve ZnO parçacıkları Al_2O_3 ile karıştırılmıştır. Hesaplamalarda kullanılan bu hibrit soğutucu akışkan modelleri Çizelge 5.1’de verilmiştir.

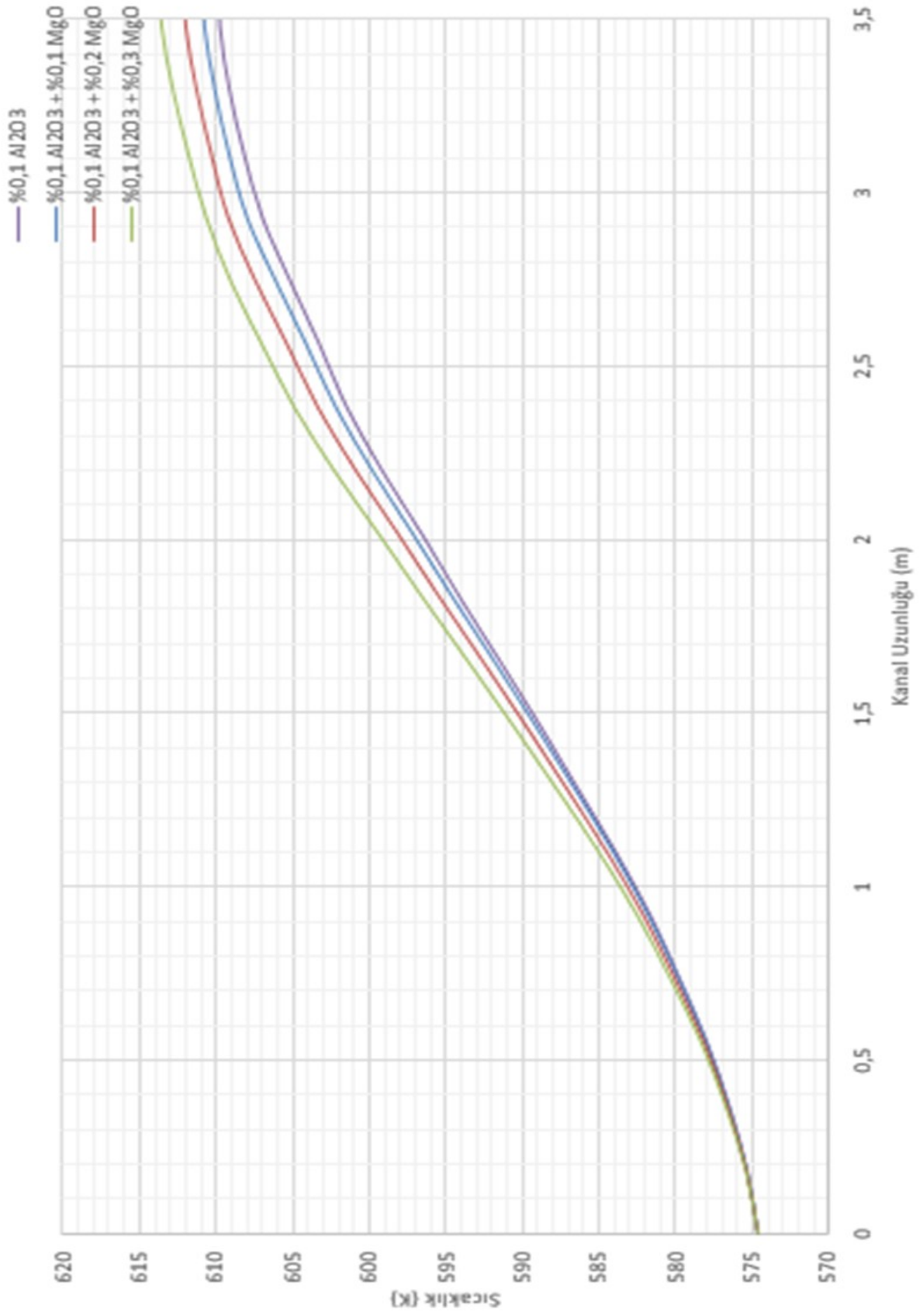
Çizelge 5.1. Hesaplamalarda kullanılan hibrit soğutucu akışkan modelleri

Durum 1	%0,1 Al_2O_3
Durum 2	%0,1 Al_2O_3 + %0,1 MgO
Durum 3	%0,1 Al_2O_3 + %0,2 MgO
Durum 4	%0,1 Al_2O_3 + %0,3 MgO
Durum 5	%0,1 Al_2O_3 + %0,1 ZnO
Durum 6	%0,1 Al_2O_3 + %0,2 ZnO
Durum 7	%0,1 Al_2O_3 + %0,3 ZnO

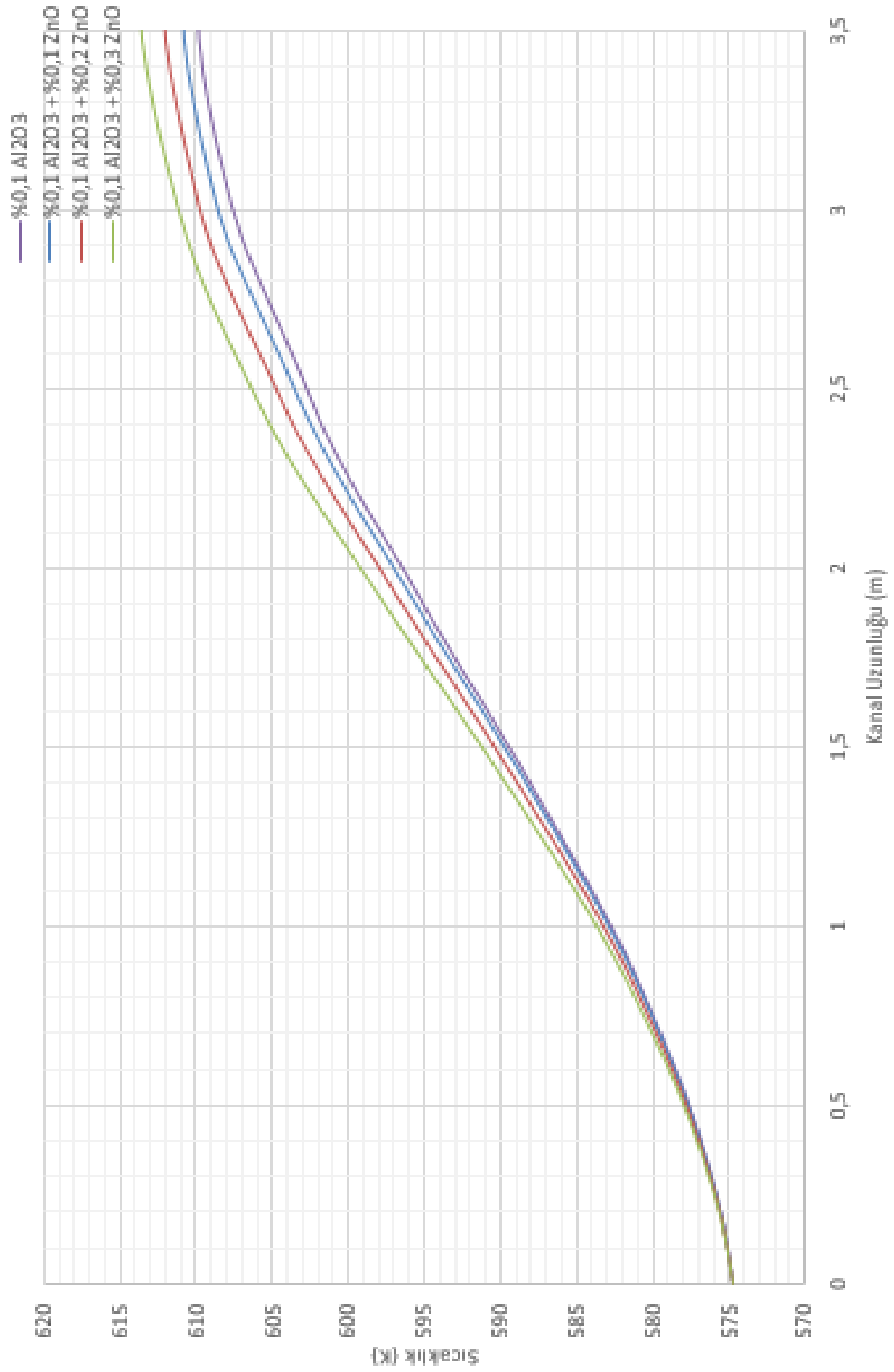
VVER-1000 nükleer koru yakıt kanallarındaki sıcaklık değişimini incelemek için, yakıt kanalları sıcaklık değişimini veren termal hidrolik analiz kodu COBRA IV PC çıktısı incelenmiştir. Bu çalışmada yakıt kanalı boyunca meydana gelen en sıcak bölge incelenmiştir. Reaktör güvenliği açısından reaktör korunda oluşabilecek ergime, kaza riski,

kaynama vb. durumlar için en sıcak bölge incelenerek güvenlik sınırları kullanılan parametrelere bağlı olarak belirlenmeye çalışılmıştır.

Nanoparçacık içeren akışkanların özelliklerini daha iyi gözlemleyebilmek için, öncelikle reaktörde soğutucu akışkan olarak su + % 0,1 Al_2O_3 nanoparçacık karışımı kullanılarak analizler gerçekleştirilmiştir. % 0,1 Al_2O_3 eklenen soğutucuda $x=0$ m'de soğutucunun kanal giriş sıcaklığı 575 K iken, kanal sonunda $x= 3,5$ m'de 609,81 K olarak ölçülmüştür. Kanal sonunda ölçülen sıcaklık %0,1 Al_2O_3 + %0,1 MgO için 610,96 K, %0,1 Al_2O_3 + %0,2 MgO için 612,09 K, %0,1 Al_2O_3 + %0,3 MgO için ise 613,67 K seviyelerindedir. Şekil 5.2'de görüldüğü gibi sırasıyla %0,1 – %0,2 - %0,3 oranlarında eklenen MgO karışımı içeren nanoparçacıklı soğutucu akışkanlar için kanal boyunca sıcaklık, artan nanoparçacıkla artış göstermekte ve 613,67 K'e kadar yükseliş sergilemektedir. Şekil 5.3'te ise %0,1 Al_2O_3 + %0,1 ZnO, %0,1 Al_2O_3 + %0,2 ZnO ve %0,1 Al_2O_3 + %0,3 ZnO için hesaplamalar incelendiğinde, %0,1 Al_2O_3 'ya eklenen her %0,1 oranında MgO için sıcaklık değeri yaklaşık olarak %0,2 artmaktadır.

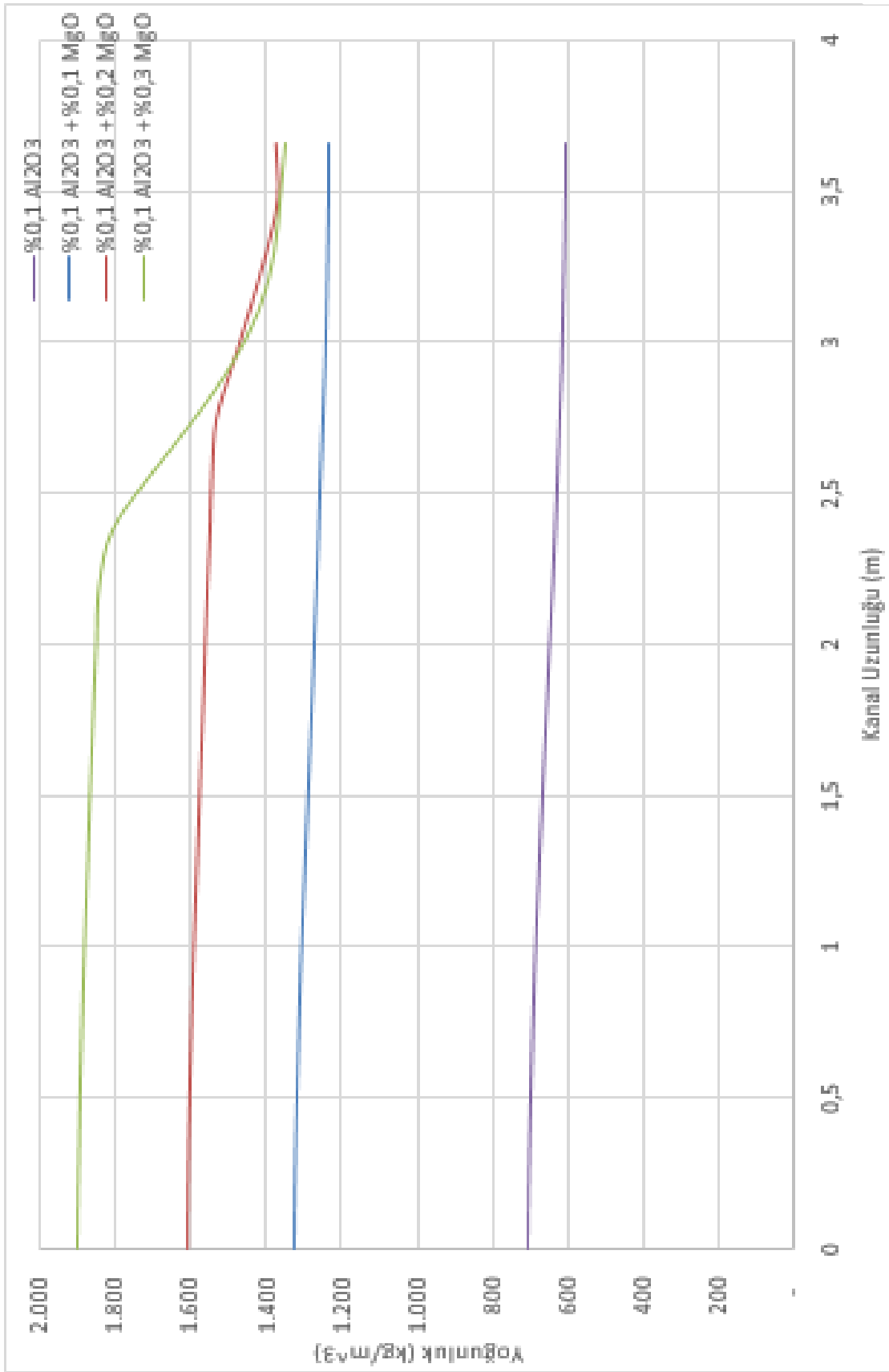


Şekil 5.2. MgO için soğutucu sıcaklığının kanal boyu değişimi

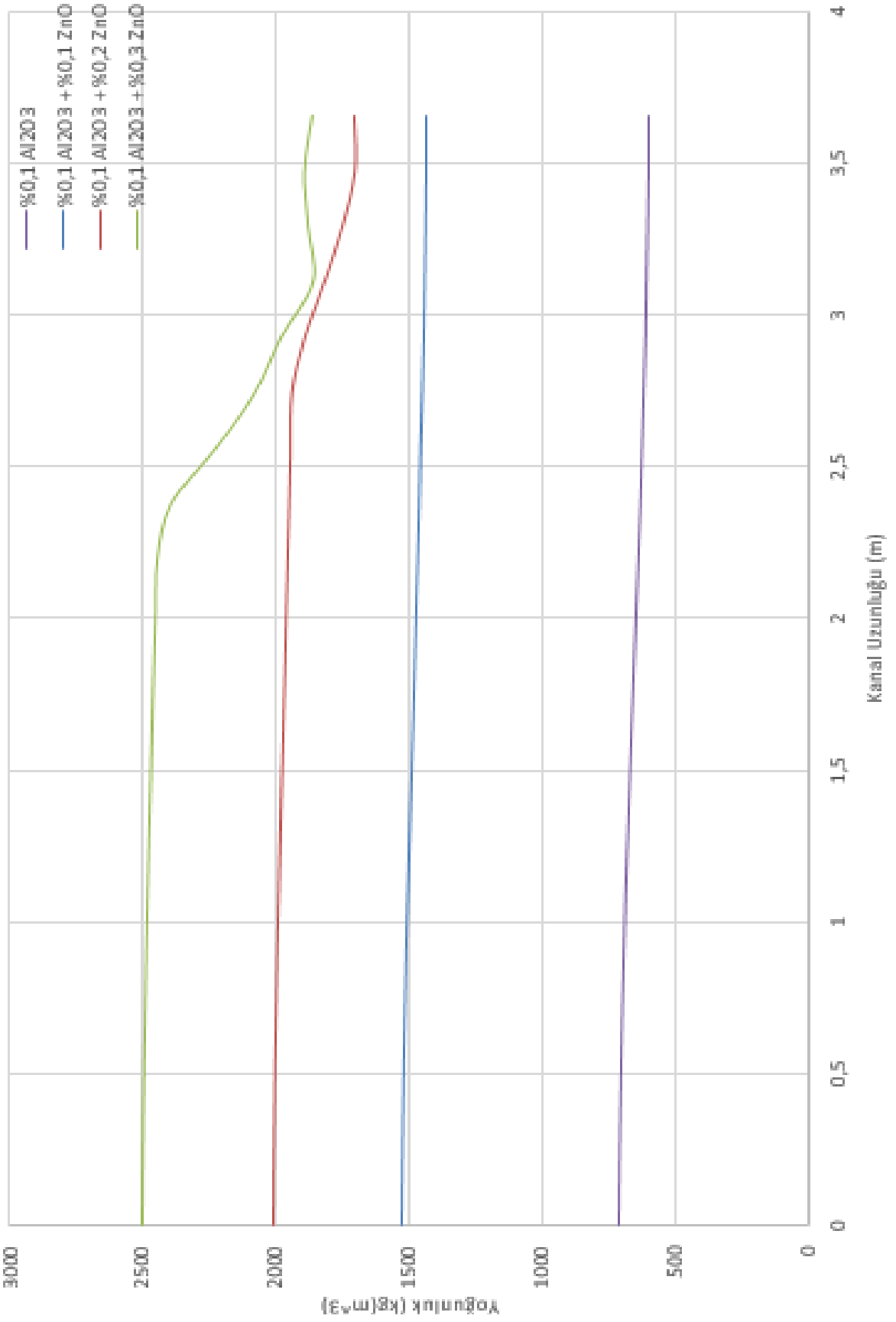


Şekil 5.3. ZnO için soğutucu sıcaklığının kanal boyu değişimi

Nanoparçacık içeren akışkanların kanal boyunca yoğunluk değişimleri Şekil 5.4 ve Şekil 5.5'de incelenmiştir. Şekil 5.4 incelendiğinde, soğutucu akışkan su + % 0,1 Al₂O₃ nanoparçacık karışım için kanal boyunca yoğunluk başlangıçta 709 kg/m³ ile başlayıp kanal sonunda %14'lük bir düşüş sergilemiştir. Öte yandan, Şekil 5.4'de görüldüğü gibi %0,1 Al₂O₃ + %0,1 MgO, %0,1 Al₂O₃ + %0,2 MgO, %0,1 Al₂O₃ + %0,3 MgO karışımı içeren nanoparçacıklı soğutucu akışkanlar için kanal boyunca yoğunluk değişimi artan nanoparçacıkla artış göstermekte ve en yüksek yoğunluk değeri 1897 kg/m³ ile %0,1 Al₂O₃ + %0,3 MgO'de gözlemlenmiştir. Şekil 5.4'de verildiği gibi başlangıçta % 0,1 Al₂O₃ + % 0,1 MgO için x=0,0 m'de 1322 kg/m³ hesaplanırken, % 0,1 Al₂O₃ + % 0,2 MgO için x=0,0 m'de 1610 kg/m³, % 0,1 Al₂O₃ + % 0,3 MgO için x=0,0 m'de yoğunluk 1897 kg/m³ olarak hesaplanmış ve yoğunluk değeri artan nanoparçacık oranıyla artış göstermiş, kanal boyunca da yoğunluk değerinde düşüş gözlemlenmiştir. İlaveten Şekil 5.5'de görüldüğü gibi % 0,1 Al₂O₃ + % 0,1 ZnO, % 0,1 Al₂O₃ + % 0,2 ZnO, % 0,1 Al₂O₃ + % 0,3 ZnO karışımı içeren nanoparçacıklı soğutucu akışkanlar için kanal boyunca yoğunluk değişimi artan nanoparçacıkla artış göstermekte ve 2507 kg/m³ kadar yükseliş sergilemektedir. Şekil 5.5'de verildiği gibi başlangıçta % 0,1 Al₂O₃+% 0,1 ZnO için x=0,0 m'de 1525 kg/m³ hesaplanırken, % 0,1 Al₂O₃+% 0,2 ZnO için x=0,0 m'de 2015 kg/m³, % 0,1 Al₂O₃+% 0,3 ZnO için x=0,0 m'de yoğunluk 2507 kg/m³ olarak gözlemlenmektedir. MgO ile kıyaslandığında ZnO için eklenen nanoparçacıkların yoğunluk değerini artırdığı gözlemlenmiştir.

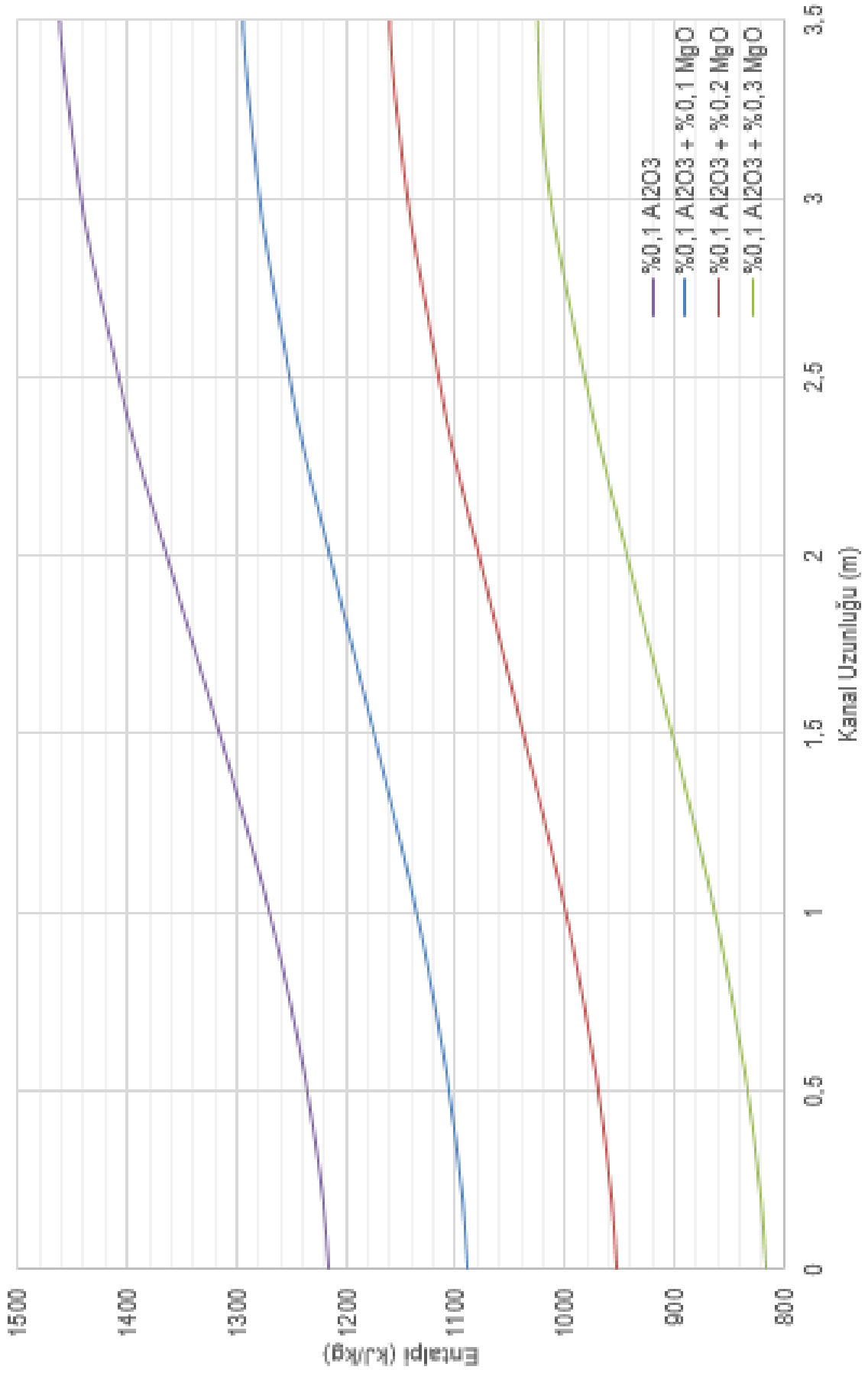


Şekil 5.4. MgO durumları için yoğunluk değişimleri

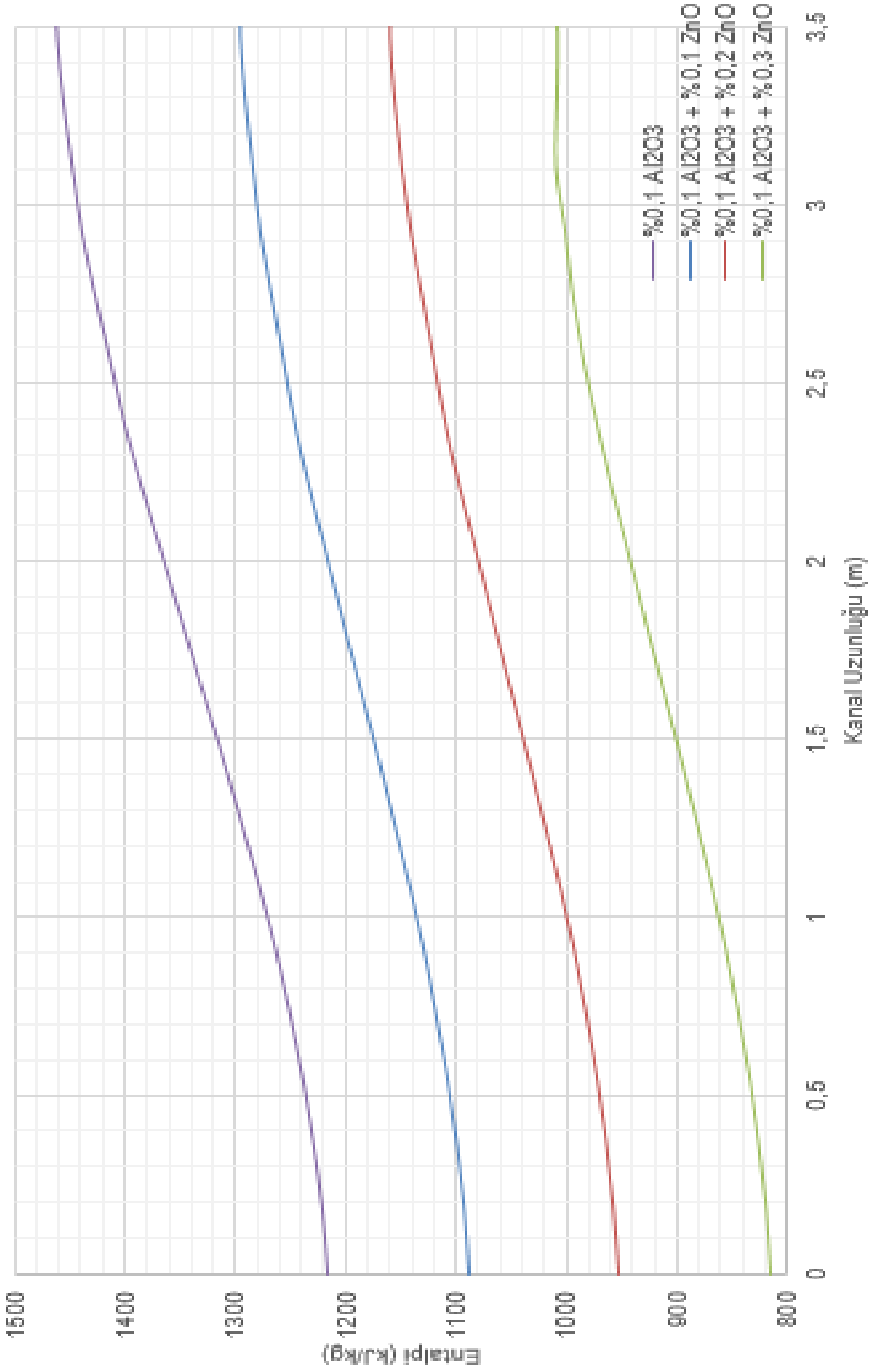


Şekil 5.5. ZnO durumları için yoğunluk değişimleri

Nanoparçacık içeren akışkanların kanal boyunca entalpi değişimleri Şekil 5.6 ve Şekil 5.7’de incelenmiştir. Şekil 5.6 incelendiğinde, soğutucu akışkan su + % 0,1 Al₂O₃ nanoparçacık karışım için kanal boyunca entalpi başlangıçta 1217 kJ/kg olarak elde edilmiş ve kanal boyunca %17’lik artış göstererek x= 3,5 m’de 1461 kJ/kg olarak ölçülmüştür. Şekil 5.6 incelendiğinde, başlangıçta % 0,1 Al₂O₃+% 0,1 MgO için x=0,0 m’de entalpi değişimi 1088 kJ/kg hesaplanırken, x=3,5 m’de entalpi değişimi 1295 kJ/kg hesaplanmıştır. % 0,1 Al₂O₃+% 0,2 MgO için x=0,0 m’de entalpi değişimi 952 kJ/kg hesaplanırken, x=3,5 m’de entalpi değişimi 1161 kJ/kg, % 0,1 Al₂O₃+% 0,3 MgO için x=0,0 m’de entalpi değişimi 816 kJ/kg hesaplanırken, x=3,5 m’de entalpi değişimi 1024 kJ/kg hesaplanmıştır. Kanal boyunca sistemdeki entalpi değişimi yaklaşık olarak %18 seviyesinde artış göstermiş olmakla birlikte her % 0,1 oranında artan nanoparçacık ile entalpi %10 düşüş göstermiştir. Ayrıca, Şekil 5.7’de görüldüğü gibi %0,1 - %0,2 - %0,3 oranında ZnO eklenen nanoparçacıklı soğutucu akışkanlar için kanal boyunca entalpi değişimi aynı sonuçları doğurmaktadır. Başlangıçta % 0,1 Al₂O₃+% 0,1 ZnO için x=0,0 m’de entalpi değişimi 1088 kJ/kg hesaplanırken, x=3,5 m’de entalpi değişimi 1295 kJ/kg, 0,1 Al₂O₃+% 0,2 ZnO için x=0,0 m’de entalpi değişimi 952 kJ/kg hesaplanırken, x=3,5 m’de entalpi değişimi 1159 kJ/kg, % 0,1 Al₂O₃+% 0,3 ZnO için x=0,0 m’de entalpi değişimi 816 kJ/kg hesaplanırken, x=3,5 m’de entalpi değişimi 1008 kJ/kg hesaplanmıştır. Kanal boyunca sistemdeki entalpi değişimi yaklaşık olarak %18 seviyesinde artış göstermiş olmakla birlikte her % 0,1 oranında artan nanoparçacık ile entalpi %10 düşüş göstermiştir. Bu sonuçlara göre MgO eklenmiş soğutucunun ZnO eklenmiş soğutucuya göre daha yüksek entalpi değerlerine ulaştığını gözlemlenmiştir.



Şekil 5.6. MgO durumları için entalpi değişimleri



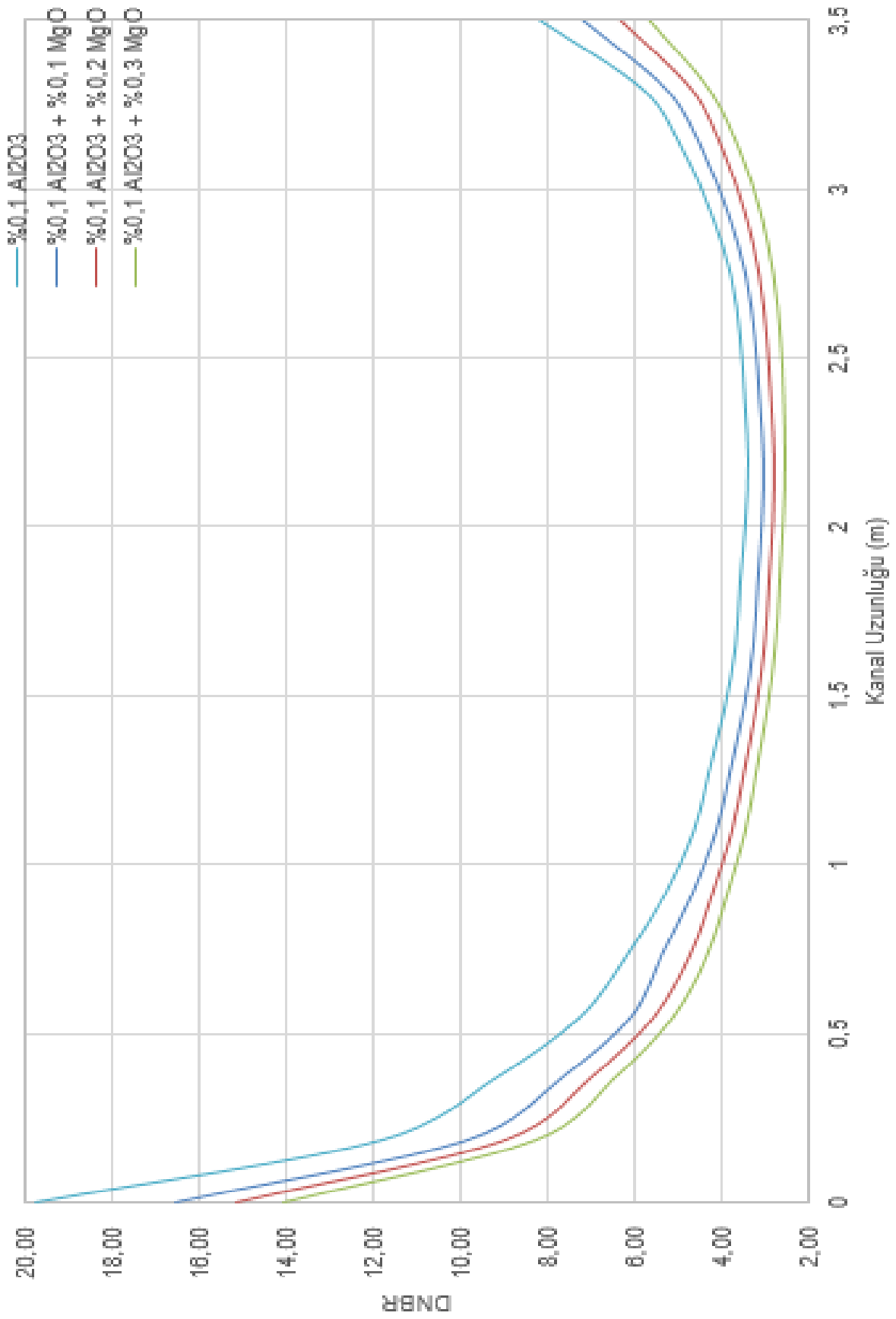
Şekil 5.7. ZnO durumları için entalpi değişimleri

COBRA termal hidrolik analizlerinde reaktör güvenlik analizi açısından değerlendirilmek zorundadır. Reaktör güvenlik analizi açısından değerlendirebilmek için çekirdek kaynama oranı (DNBR)'nin analiz edilmesi gerekmektedir. Çekirdek kaynama oranı MDNBR sıcak kanaldaki kritik ısı akısının (\dot{q}_{CHF}), yakıt çubuğunun gerçek ısı akısına ($\dot{q}_{gerçek}$) oranı olarak Denklem 5.2'de verilmiştir.

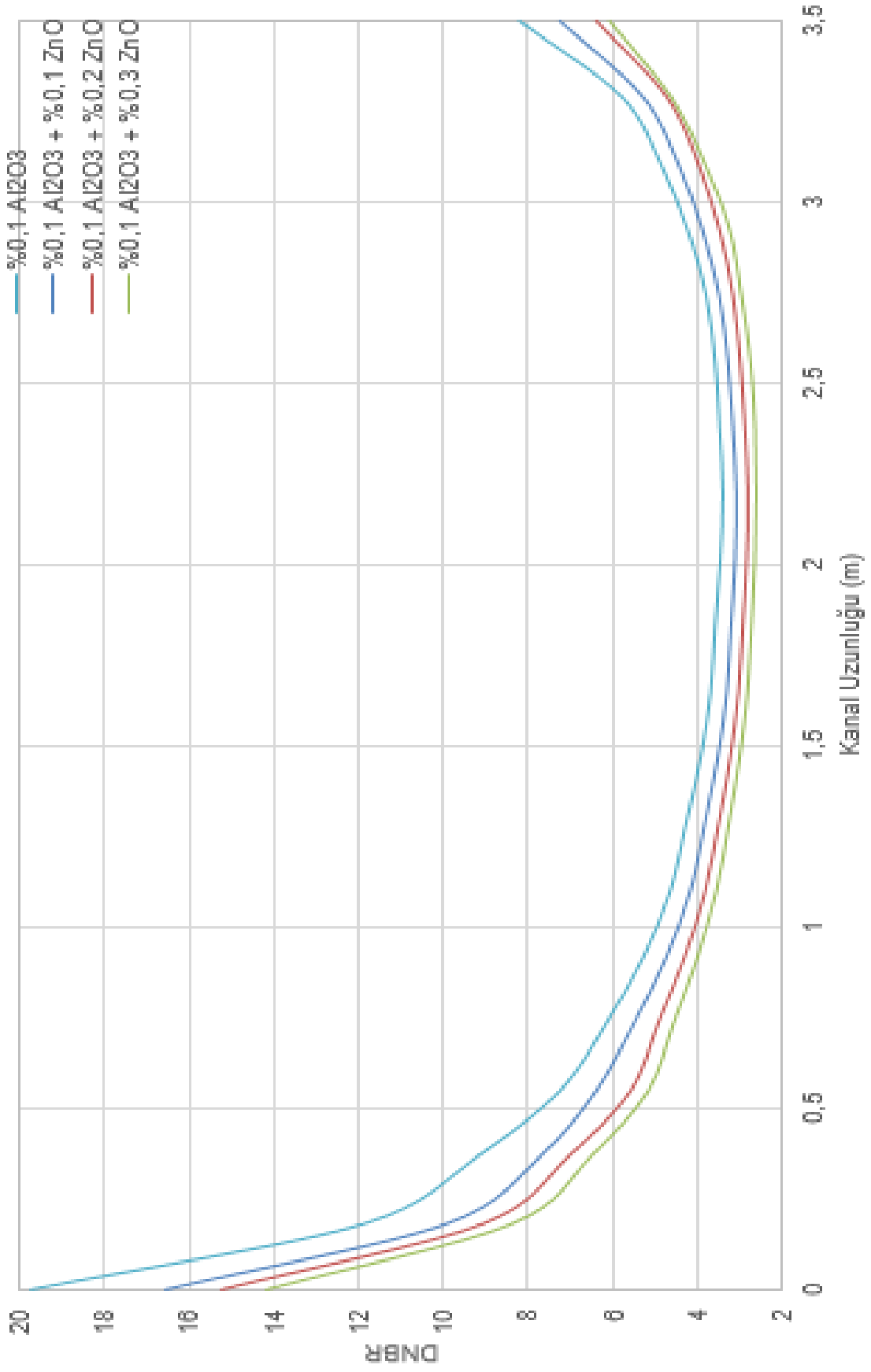
$$DNBR = \frac{\dot{q}_{CHF}}{\dot{q}_{gerçek}} \quad (5.2)$$

Yukarıda belirtildiği gibi kararlı durum çalışma koşulu için ana termal hidrolik güvenlik limiti olan çekirdek kaynama oranından minimum sapma DNBR literatür çalışmalarında VVER-1000 nükleer reaktörü için yaklaşık olarak "2" olarak tanımlanmış olmakla birlikte 1,75'ten düşük olmamalıdır [42]. Yapılan bu çalışmadaki hesaplamada Şekil 5.8'de görüldüğü gibi kanal boyunca reaktör soğutucu akışkanı olarak suya % 0,1 oranında eklenmiş Al_2O_3 kullanıldığında kanal boyunca $x=0$ m'de 19,72; $x=2$ m'de 3,45 ve $x=3,5$ m de ise 8,19 DNBR olarak elde edilmiştir. Su + % 0,1 Al_2O_3 karışımli nanoparçacıklı soğutucuya Çizelge 5.1'de belirtilen MgO ve ZnO karışımıyla Şekil 5.8 ve Şekil 5.9'da görüldüğü gibi kanal boyunca artan hibrit nanoparçacıkla çekirdek kaynama oranından minimum sapma DNBR'nin de azaldığı görülmektedir. Şekil 5.8 incelendiğinde, % 0,1 Al_2O_3 +% 0,1 MgO için kanal boyunca $x=0$ m'de 16,55; $x=2$ m'de 3,08 ve $x=3,5$ m de ise 7,22 DNBR olarak hesaplanırken, % 0,1 Al_2O_3 +% 0,2 MgO için kanal boyunca $x=0$ m'de 15,15; $x=2$ m'de 2,83 ve $x=3,5$ m de ise 6,35, % 0,1 Al_2O_3 +% 0,3 MgO için kanal boyunca $x=0$ m'de 14,03; $x=2$ m'de 2,62 ve $x=3,5$ m de ise 5,70 DNBR olarak hesaplanmıştır. %0,1 oranında eklenen MgO için kanal boyunca ölçülen minimum DNBR değerleri ise sırasıyla 3,05, 2,80, 2,58 olarak ölçülmüştür ve her %0,1 oranında eklenen nanoparçarcık DNBR değerini %8 düşürmektedir. Şekil 5.8 gösteriyor ki çalışmada kullanılan oranlar literatürde belirtilen DNBR değeri olan 2'nin altına düşmemiştir. Diğer taraftan Şekil 5.9 incelendiğinde ise % 0,1 Al_2O_3 +% 0,1 ZnO için için kanal boyunca $x=0$ m'de 16,58; $x=2$ m'de 3,08 ve $x=3,5$ m de ise 7,24 DNBR olarak hesaplanırken, % 0,1 Al_2O_3 +% 0,2 ZnO için kanal boyunca $x=0$ m'de 15,25; $x=2$ m'de 2,84 ve $x=3,5$ m de ise 6,39, % 0,1 Al_2O_3 +% 0,3 ZnO için kanal boyunca $x=0$ m'de 14,19; $x=2$ m'de 2,63 ve $x=3,5$ m de ise 6,08 DNBR olarak elde edilmiştir. %0,1 oranında eklenen ZnO için kanal boyunca ölçülen minimum DNBR değerleri ise sırasıyla 3,05, 2,81, 2,60 olarak ölçülmüştür ve her %0,1 oranında eklenen nanoparçarcık DNBR değerini %8 düşürmektedir. Hibrit karışımli nanoparçacıklı

soğutucu için elde edilen DNBR genel olarak değerlendirildiğinde literatür çalışmalarında verilen minimum değer ile uyumlu olduğu ve termal hidrolik güvenlik limiti olan çekirdek kaynama oranından minimum sapma DNBR'e eşdeğer olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 5.8. MgO durumları için DNBR değişimleri



Şekil 5.9. ZnO durumları için DNBR değişimleri

Her ne kadar DNBR değeri güvenlik limitlerinin altında kalmasa da bir basınçlı su reaktöründe dizayn parametreleri gereği kaynama olmaması gerekir. Bu nedenle % 0,2 hacimli nano akışkanın kullanılması tercih edilmemelidir.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez kapsamında, % 3,7 zenginleştirilmiş uranyum dioksit (UO_2) nükleer yakıtlı VVER-1000 nükleer reaktöründe hibrit nanoparçacıklı soğutucu akışkanlar kullanılarak reaktörün termal hidrolik analizi incelenmiştir. Bu tez çalışmasından elde edilen sonuçlar ve öneriler aşağıda maddeler halinde sunulmuştur.

- Her nanoparçacık için soğutucu özelliklerinin reaktör termal hidrolik sonuçları üzerindeki etkisi, soğutucu sıcaklık değerleri, atomik yoğunluk değişimi, entalpi değişimi ve DNBR değerleri incelenmiştir. Hesaplamalarda artan nanoparçacık oranıyla birlikte soğutucu sıcaklığının arttığı gözlemlenmiştir.
- % 0,1 Al_2O_3 hacim oranında kullanılan nanoparçacıklar en sıcak değeri 609,81 K olarak elde edilmiştir.
- % 0,1 Al_2O_3 + % 0,1 MgO hibrit soğutucu akışkan kullanıldığında en sıcak değeri 610,96 K olarak elde edilirken, % 0,1 Al_2O_3 + %0,3 MgO hibrit soğutucu akışkan kullanıldığında en sıcak değeri 613,67 K olarak elde edilmiştir.
- % 0,1 Al_2O_3 + % 0,1 ZnO hibrit soğutucu akışkan kullanıldığında en sıcak değeri 610,96 K olarak elde edilirken, % 0,1 Al_2O_3 + % 0,3 ZnO hibrit soğutucu akışkan kullanıldığında en sıcak değeri 613,67 K olarak elde edilmiştir.
- Kanal boyunca artan hibrit nanoparçacıkla çekirdek kaynama oranından minimum sapma DNBR'nin de azaldığı tespit edilmiştir.
- % 0,1 Al_2O_3 + % 0,1 MgO hibrit soğutucu akışkan kullanıldığında minimum DNBR değeri 7,2 olarak elde edilirken, % 0,1 Al_2O_3 + % 0,3 MgO hibrit soğutucu akışkan kullanıldığında minimum DNBR değeri 5,7 olarak elde edilmiştir.
- % 0,1 Al_2O_3 + %0,1 ZnO hibrit soğutucu akışkan kullanıldığında minimum DNBR değeri 7,2 olarak elde edilirken, % 0,1 Al_2O_3 + %0,3 ZnO hibrit soğutucu akışkan kullanıldığında minimum DNBR 6,1 olarak elde edilmiştir.
- Genel değerlendirildiğinde nano akışkan kullanımının ısı transferini arttırdığı, bu çalışma kapsamında da nano akışkan kullanımının sistemden daha çok ısı çekilmesini sağlayarak, güvenlik sınırları içerisinde reaktör soğutucu suyu sıcaklığını arttırdığı sonucu elde edilmiştir.

Daha sonra yapılabilecek çalışmalar için aşağıda maddeler önerilmiştir.

KAYNAKLAR

1. İnternet: Türkiye İstatistik Kurumu. (2022). URL: <https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Sera-Gazi-Emisyon-Istatistikleri-1990-2020-45862>. Son Erişim Tarihi: 20.12.2022.
2. Lamarsh, J. R., and Baratta, A. J. (2016). *Nükleer Mühendisliğe Giriş* (Birinci Baskı), Türkiye: Palme Yayınevi, 1-4.
3. İnternet: Nükleer Enerji Dünyası. (2017) URL: <http://www.nukleer.web.tr/>. Son Erişim Tarihi: 15.11.2022.
4. İnternet: The Power Reactor Information System (PRIS). (2022). URL: <https://pris.iaea.org/PRIS/WorldStatistics/OperationalReactorsByCountry.aspx>. Son Erişim Tarihi: 25.12.2022.
5. İnternet: Science History Institute. (2017). URL: <https://sciencehistory.org/historical-profile/otto-hahn-lise-meitner-and-fritz-strassmann>. Son Erişim Tarihi: 25.12.2022.
6. Webb, B.J.. (1988). *A Personal Computer Version of CobraIV-I for Thermal-Hydraulic Analysis of Rod Bundle Nuclear Fuel Elements and Cores*. Washington: Pacific Northwest Laboratory, 1-2.
7. Hadad, K., Hajizadeh, A., Jafarpour, K., and Ganapol, B. D. (2010). Neutronic study of nanofluids application to VVER-1000. *Annals of Nuclear Energy*, 37(11), 1447–1455.
8. Zarifi, E., Jahanfarnia, G., and Veysi, F. (2013). Neutronic simulation of water-based nanofluids as a coolant in VVER-1000 reactor. *Progress in Nuclear Energy*, 65, 32–41.
9. Safarzadeh, O., Shirani, A. S., Minucmehr, A., and Saadatian-Derakhshandeh, F. (2014). Coupled neutronic/thermo-hydraulic analysis of water/Al₂O₃ nanofluids in a VVER-1000 reactor. *Annals of Nuclear Energy*, 65, 72–77.
10. Ebrahimian, M., and Ansarifar, G. R. (2016). Investigation of the nano fluid effects on heat transfer characteristics in nuclear reactors with dual cooled annular fuel using CFD (Computational Fluid Dynamics) modeling. *Energy*, 98, 1–14.
11. Ghazanfari, V., Talebi, M., Khorsandi, J., and Abdolahi, R. (2016b). Thermal-hydraulic modeling of water/Al₂O₃ nanofluid as the coolant in annular fuels for a typical VVER-1000 core. *Progress in Nuclear Energy*, 87, 67–73.
12. Ghazanfari, V., Talebi, M., Khorsandi, J., and Abdolahi, R. (2016a). Effects of water based Al₂O₃, TiO₂, and CuO nanofluids as the coolant on solid and annular fuels for a typical VVER-1000 core. *Progress in Nuclear Energy*, 91, 285–294.

13. Saadati, H., Hadad, K., and Rabiee, A. (2018). Safety margin and fuel cycle period enhancements of VVER-1000 nuclear reactor using water/silver nanofluid. *Nuclear Engineering and Technology*, 50(5), 639–647.
14. Kianpour, R., and Ansarifar, G. R. (2019). Assessment of the nano-fluid effects on the thermal reactivity feedback coefficients in the VVER-1000 nuclear reactor with nano-fluid as a coolant using thermal hydraulic and neutronics analysis. *Annals of Nuclear*, 133, 623-636.
15. Uzun S., Genç Y. ve Acır A.. (2021). VVER-1000 reaktöründe alüminyum nanoparçacıklı soğutucunun termal performansının incelenmesi. *Politeknik Dergisi*, 24 (3): 1009-1015.
16. Nematollahi, M., Behzadinejad, B., and Golestani, A. (2015). Feasibility study of using nanofluids as a neutron absorber in reactor emergency core cooling system. *International Journal of Hydrogen Energy*, 40(44), 15192–15197.
17. Mousavizadeh, S. M., Ansarifar, G. R., and Talebi, M. (2015). Assessment of the TiO₂/water nanofluid effects on heat transfer characteristics in VVER-1000 nuclear reactor using CFD modeling. *Nuclear Engineering and Technology*, 47(7), 814–826.
18. Ghahdarijani, A. M., Hormozi, F., and Asl, A. H. (2017). Convective heat transfer and pressure drop study on nanofluids in double-walled reactor by developing an optimal multilayer perceptron artificial neural network. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 84, 11-19.
19. Nourollahi, R., Esteki, M. H., and Jahanfarnia, G. (2019). Neutronic analysis of a VVER-1000 reactor with nanofluid as coolant through zeroth order average current nodal expansion method. *Progress in Nuclear Energy*, 116, 46–61.
20. Acır A.. (2004). *PACER Füzyon Reaktöründe Yakıt ve Enerji Üretiminin İncelenmesi*. Doktora Tezi. Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, Türkiye.
21. İnternet: Bellona Foundation. (2017). URL: <https://bellona.org/news/nuclear-issues/2017-01-russias-first-vver-440-reactor-shuts-for-decommissioning>. Son Erişim Tarihi: 13.01.2023.
22. İnternet: Akkuyu Nükleer Rosatom. (2022). URL: <http://www.akkuyu.com/projenin-tarihcesi?ysclid=1c3o65nuqt336775167>. Son Erişim Tarihi: 25.12.2022.
23. ROSATOM The VVER Today, Evolution, Design, Safety, Overseas Report.
24. İnternet: Exporters and Investors Council (EIC) under the Ministry of Foreign Affairs of Ukraine. (2019). URL: <https://rei.mfa.gov.ua/storage/app/sites/139/kyiv-institut-of-energy-products.pdf> Son Erişim Tarihi: 25.12.2022.

25. Faghihi, F., Mirvakili, S.M., Safaei, S., Bagheri, S.. (2016). Neutronics and sub-channel thermal-hydraulics analysis of the Iranian VVER-1000 fuel bundle. *Progress in Nuclear Energy*, 87, 39-46.
26. İnternet: Energy Education. (2022). URL: https://energyeducation.ca/encyclopedia/Boiling_water_reactor. Son Erişim Tarihi: 13.01.2023.
27. İnternet: Energy Education. (2022). URL: https://energyeducation.ca/encyclopedia/Pressurized_heavy_water_reactor. Son Erişim Tarihi: 13.01.2023.
28. İnternet: International Atomic Energy Agency. (2021). URL: <https://www.iaea.org/topics/gas-cooled-reactors/technical-working-group-on-gas-cooled-reactors-twg-gcr>. Son Erişim Tarihi: 13.01.2023.
29. Uzun S.. (2020). *Toryum Yakıtlı VVER-1000 Reaktöründe Farklı Nano Soğutucu Akışkanların Nötronik Ve Termal Analizi*. Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, Türkiye.
30. İnternet: International Atomic Energy Agency. (1997). URL: https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/28/065/28065353.pdf. Son Erişim Tarihi: 25.12.2022.
31. İnternet: Türkiye Enerji, Nükleer ve Maden Araştırma Kurumu Kurumsal Araştırma Arşivi. (2018). URL: <https://kurumsalarsiv.tenmak.gov.tr/handle/20.500.12878/662>. Son Erişim Tarihi: 20.12.2022.
32. Uzun S., Genç, Y., and Acır, A. (2022). Investigation of hybrid nanofluids effects on heat transfer characteristics in VVER-1000 nuclear reactor. *Progress in Nuclear Energy*, 154.
33. Todres, N.E., Kazimi, M.S.. (2001). *Nuclear Systems II Elements of Thermal Hydraulic Design*. Taylor and Francis, Newyork.
34. Yalcın, Gokberk. (2020). *Nano Akışkanların Isı İletim Katsayısı Ve Viskozite Değişimlerinin Deneysel İncelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Trakya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Edirne, Türkiye.
35. Li, Y., Zhou, J., Tung, S., Schneider, E., and Xi, S. (2009). A review on development of nanofluid preparation and characterization. *Powder Technology*, 196(2), 89–101.
36. Mahbulbul, I. M., Saidur, R., and Amalina, M. A. (2012). Latest developments on the viscosity of nanofluids. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 55(4), 874–885.

37. Aytaç, İ. (2020). Hibrit Nano akışkanların Termofiziksel Özelliklerinin Isıl Davranışları. *Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology*, 8 (4) , 810-829.
38. Bhattad, A., Sarkar, J.. (2021). Effects of nanoparticle shape and size on the thermohydraulic performance of plate evaporator using hybrid nanofluids. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 143 (1), 767–779.
39. S. S. Chougule and S. K. Sahu. (2013). *Model of heat conduction in hybrid nanofluid*. 2013 IEEE International Conference ON Emerging Trends in Computing, Communication and Nanotechnology (ICECCN), Tirunelveli, India, 337-341
40. Sahu M, S.J.. (2019). Steady-state energetic and exergetic performances of single-phase natural circulation loop with hybrid nanofluids. *Journal of Heat Transfer*. 141 (8), 082401.
41. Corcione, M.. (2010). Heat transfer features of buoyancy-driven nanofluids inside rectangular enclosures differentially heated at the sidewalls. *Int. J. Therm. Sci.* 49 (9), 1536–1546.
42. Mohamed, Y.M. Mohsen, Soliman, Abdelfattah Y., Abdel-Rahman, Mohamed A.E. (2020). Thermal-hydraulic and solid mechanics safety analysis for VVER-1000 reactor using analytical and CFD approaches. *Prog. Nucl. Energy*, 130, 103568.



Gazili olmak ayrıcalıktır