
GAZİ ÜNİVERSİTESİ
Gazi
1926

TORYUM YAKITLI VVER-1000 REAKTÖRÜNDE FARKLI NANO SOĞUTUCU AKIŞKANLARIN NÖTRONİK VE TERMAL ANALİZİ

Sinem UZUN

DOKTORA TEZİ
ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ARALIK 2020

Sinem UZUN tarafından hazırlanan "TORYUM YAKITLI VVER-1000 REAKTÖRÜNDE FARKLI NANO SOĞUTUCU AKIŞKANLARIN NÖTRONİK VE TERMAL ANALİZİ" adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Gazi Üniversitesi Enerji Sistemleri Mühendisliği Ana Bilim Dalında Doktora Tezi olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Prof. Dr. Adem ACIR

Enerji Sistemleri Mühendisliği, Gazi Üniversitesi ……..……..

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum.

Başkan: Prof. Dr. Mustafa İLBAŞ

Enerji Sistemleri Mühendisliği, Gazi Üniversitesi ...……

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum.

Üye: Prof. Dr. Adnan SÖZEN

Enerji Sistemleri Mühendisliği, Gazi Üniversitesi ...……

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum.

Üye: Doç. Dr. Mahmut ALKAN

Makine Mühendisliği, Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi .....……

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum.

Üye: Dr. Öğr. Üyesi Emre KOÇ

Makine Mühendisliği, Başkent Üniversitesi ...……

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum.

Tez Savunma Tarihi: 23/12/2020

Jüri tarafından kabul edilen bu çalışmanın Doktora Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

……

Prof. Dr. Cevriye GENCER

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYAN

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

- 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 çalışmasında 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.

……..
Sinem UZUN
23/12/2020

TORYUM YAKITLI VVER-1000 REAKTÖRÜNDE FARKLI NANO SOĞUTUCU AKIŞKANLARIN NÖTRONİK VE TERMAL ANALİZİ

(Doktora Tezi)

Sinem UZUN

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Aralık 2020

ÖZET

Bu tez çalışmasındaki öncelikli amaç nükleer reaktörlerde en yaygın kullanılan yakıt olan UO_2 (uranyum dioksit) bileşiminin rezervleri sınırlı ve ekonomik maliyeti fazla olduğu için, UO_2 'ye alternatif olabilecek yakıt önerisinde bulunmaktır. Bu tez kapsamında Th elementi, reaktör mevcut yakıtına %5, %10, %15 ve %20 oranlarında karıştırılarak, reaktör verimi analiz edilmiştir. Bu analizler MCNP kodu kullanılarak yapılmıştır. Bu analizler sonucu kritiklik ve bağıl güç yoğunluğu değerleri elde edilmiştir. Tezin ikinci ve en önemli aşamasında ise, yine reaktör verimine etki etmesi hedeflenerek, mevcut soğutucu akışkana (su), çeşitli tür ve oranlarda nano parçacık eklenerek, soğutucunun sıcaklık ve DNB (Departure from Nucleate Boiling) oranı incelenmiştir. Nano parçacık olarak Al_2O_3, CuO ve TiO_2 seçilmiş ve herbiri % 0,01, % 0,05, % 0,1 ve % 0,2 oranlarında sırasıyla soğutucuya eklenmiş ve analizleri COBRA-IV PC termal analiz kodu ile yapılmıştır. Yapılan analizler sonucu kanal boyunca soğutucunun ulaştığı en yüksek sıcaklık 617,35 K ve en düşük DNBR değeri 2,974 olarak elde edilmiş ve sonuçlar birbirleri ile karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak akış için en verimli durumun %5 ThO_2 ve %0,1 Al_2O_3 olduğu görülmüştür.

Bilim Kodu : 92805
Anahtar Kelimeler : Nükleer Enerji Sistemleri
Sayfa Adedi : 111
Danışman : Prof. Dr. Adem ACIR

NEUTRONIC AND THERMAL ANALYSIS OF DIFFERENT NANO COOLANTS OF THE THORIUM FUELED VVER 1000 REACTOR

(Ph. D. Thesis)

Sinem UZUN

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

December 2020

ABSTRACT

The primary purpose of this thesis is to propose an alternative fuel to UO_2 (uranium dioxide) which is the most widely used fuel in nuclear reactors, since the limited reserves and economic cost of UO_2 are high. Within the scope of this thesis, it is aimed to analyze the reactor efficiency by mixing the Th element into the reactor's existing fuel at 5%, 10%, 15% and 20%. These analyzes are made using the MCNP code. Criticality and relative power density values are obtained as a result of these analyzes. In the second and most important phase of the thesis, it is aimed to examine the temperature and DNB (Departure from Nucleate Boiling) ratio of the coolant by adding various types and ratios of nanoparticles to the existing coolant (water), with the aim of effecting the reactor efficiency. Al_2O_3, CuO and TiO_2 are selected as nanoparticles and each of them is added to the coolant at the rates of 0.01%, 0.05%, 0.1% and 0.2% respectively, and their analysis is done with the COBRA-IV PC thermal analysis code. As a result of the analysis, the highest temperature reached by the coolant along the channel is 617,35 K and the lowest DNBR value is 2,974 and the results are compared with each other. As a result, it was seen that the most efficient case for flow is 5% ThO_2 and 0.1% Al_2O_3.

Science Code : 92805
Key Words : Nuclear Energy Systems
Page Number : 111
Supervisor : Prof. Dr. Adem ACIR

TEŞEKKÜR

Bu tezi hazırlamamda emeği geçen sayın danışmanım Prof. Dr. Adem ACIR'a teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca benden yardımını hiç esirgemeyen değerli arkadaşım Yasin GENÇ'e, bütün destekleri için canım aileme çok teşekkür ederim. Son olarak bana verdiği sonsuz enerji için oğlum Ömer' e ve en iyi dostum, meslektaşım ve yol arkadaşım Bedrettin UZUN'a çok teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET iv

ABSTRACT v

TEŞEKKÜR vi

İÇİNDEKİLER vii

ÇİZELGELERİN LİSTESİ ix

ŞEKİLLERİN LİSTESİ x

RESİMLERİN LİSTESİ xiv

SİMGELER VE KISALTMALAR xv

1. GİRİŞ 1

2. LİTERATÜR TARAMASI 5

3. NÜKLEER REAKTÖRLER 19

3.1. VVER Nükleer Reaktörü ve Çalışma Prensibi 20

3.1.1. VVER-400 21

3.1.2. VVER-1000 22

3.1.3. VVER-1000 – AES-91 & AES-92 23

3.1.4. VVER-1200 – AES-2006 24

3.1.5. Geleceğin VVER' ı - VVER-TOI 25

3.2. VVER-1000 Tasarım Özellikleri 26

3.2.1. VVER' lerde yakıt 29

4. MATERYAL VE YÖNTEM 31

4.1. MCNP 31

4.2. COBRA IV 32

4.3. Nano Akışkanlar 38

Sayfa

4.4. Bir Yakıt Olarak Toryum 41

5. NÜMERİK SONUÇLAR 45

5.1. MCNP Analiz Sonuçları 45

5.2. COBRA IV PC Analiz Sonuçları 69

6. SONUÇ 101

KAYNAKLAR 105

ÖZGEÇMİŞ 111

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge **Sayfa**

Çizelge 3.1. Reaktör türü ve özellikleri 19

Çizelge 3.2. VVER versiyonlarının gelişimi 25

Çizelge 3.3. VVER-1000 tasarım özellikleri 29

Çizelge 4.1. Su ve nano parçacıkların termofiziksel özellikleri 39

Çizelge 5.1. Toryum tabanlı yakıt ve nanoparçacıklı soğutucu kullanımının, kanal boyunca aldığı en yüksek sıcaklık ve en düşük DNBR değerleri 93

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil **Sayfa**

Şekil 3.1. VVER reaktörü genel görünümü 26

Şekil 3.2. VVER reaktörü çevrimleri a) birincil çevrim, b) ikincil çevrim, c) soğutma çevrimi (*Türkiye Atom Enerjisi Kurumu*, n.d.) 27

Şekil 3.3. Birincil sistemin şeması 27

Şekil 3.4. Basitleştirilmiş bir VVER tasarımı 28

Şekil 3.5. VVER yatay buhar üreteci 28

Şekil 4.1. Sonlu kontrol hacmi 33

Şekil 4.2. Sistem üzerinde yapılan iş 35

Şekil 4.3. Birim zamanda sistem üzerinde yapılan iş değişimi 36

Şekil 5.1. MCNP kor modeli 45

Şekil 5.2. UO_2 yakıt ve a) % 0,01, b) % 0,05, c) % 0,1, d) % 0,2 oranlı Al_2O_3 nanoparçacıklı soğutucu eklenmiş reaktörün MCNP kor modeli 46

Şekil 5.3. %5 ThO_2 yakıt ve (a) % 0,01, (b) % 0,05, (c) % 0,1, (d) % 0,2 oranlı Al_2O_3 nanoparçacıklı soğutucu eklenmiş reaktörün MCNP kor modeli 47

Şekil 5.4. %10 ThO_2 yakıt ve (a) % 0,01, (b) % 0,05, (c) % 0,1, (d) % 0,2 oranlı Al_2O_3 nanoparçacıklı soğutucu eklenmiş reaktörün MCNP kor modeli 48

Şekil 5.5. %15 ThO_2 yakıt ve (a) % 0,01, (b) % 0,05, (c) % 0,1, (d) % 0,2 oranlı Al_2O_3 nanoparçacıklı soğutucu eklenmiş reaktörün MCNP kor modeli 49

Şekil 5.6. %20 ThO_2 yakıt ve (a) % 0,01, (b) % 0,05, (c) % 0,1, (d) % 0,2 oranlı Al_2O_3 nanoparçacıklı soğutucu eklenmiş reaktörün MCNP kor modeli 50

Şekil 5.7. UO_2 yakıt ve (a) % 0,01, (b) % 0,05, (c) % 0,1, (d) % 0,2 oranlı CuO nanoparçacıklı soğutucu eklenmiş reaktörün MCNP kor modeli 51

Şekil 5.8. %5 ThO_2 yakıt ve (a) % 0,01, (b) % 0,05, (c) % 0,1, (d) % 0,2 oranlı CuO nanoparçacıklı soğutucu eklenmiş reaktörün MCNP kor modeli 52

Şekil 5.9. %10 ThO_2 yakıt ve (a) % 0,01, (b) % 0,05, (c) % 0,1, (d) % 0,2 oranlı CuO nanoparçacıklı soğutucu eklenmiş reaktörün MCNP kor modeli 53

Şekil 5.10. %15 ThO_2 yakıt ve (a) % 0,01, (b) % 0,05, (c) % 0,1, (d) % 0,2 oranlı CuO nanoparçacıklı soğutucu eklenmiş reaktörün MCNP kor modeli 54

Şekil **Sayfa**

Şekil 5.11. %20 ThO_2 yakıt ve (a) % 0,01, (b) % 0,05, (c) % 0,1, (d) % 0,2 oranlı CuO nanoparçacıklı soğutucu eklenmiş reaktörün MCNP kor modeli 55

Şekil 5.12. UO_2 yakıt ve (a) % 0,01, (b) % 0,05, (c) % 0,1, (d) % 0,2 oranlı TiO_2 nanoparçacıklı soğutucu eklenmiş reaktörün MCNP kor modeli 56

Şekil 5.13. %5 ThO_2 yakıt ve (a) % 0,01, (b) % 0,05, (c) % 0,1, (d) % 0,2 oranlı TiO_2 nanoparçacıklı soğutucu eklenmiş reaktörün MCNP kor modeli 57

Şekil 5.14. %10 ThO_2 yakıt ve (a) % 0,01, (b) % 0,05, (c) % 0,1, (d) % 0,2 oranlı TiO_2 nanoparçacıklı soğutucu eklenmiş reaktörün MCNP kor modeli 58

Şekil 5.15. %15 ThO_2 yakıt ve (a) % 0,01, (b) % 0,05, (c) % 0,1, (d) % 0,2 oranlı TiO_2 nanoparçacıklı soğutucu eklenmiş reaktörün MCNP kor modeli 59

Şekil 5.16. % 20 ThO_2 yakıt ve (a) % 0,01, (b) % 0,05, (c) % 0,1, (d) % 0,2 oranlı TiO_2 nanoparçacıklı soğutucu eklenmiş reaktörün MCNP kor modeli 60

Şekil 5.17. Su soğutuculu (nanoparçacıksız) UO_2- ThO_2 değişen oranlarına karşılık keff değerleri 61

Şekil 5.18. Homojen dağılımlı UO_2 ve % 5, % 10, % 15 ve % 20 oranında ThO_2 içeren yakıtlı reaktörde zaman karşı keff değişimi 62

Şekil 5.19. Değişen ThO_2 oranlarına göre zamana bağlı kritiklik değerleri 63

Şekil 5.20. Yanma oranlarının kritiklik değerlerine göre değişimi 64

Şekil 5.21. Nanoparçacıklı soğutucu kullanımında, yanma oranlarının kritiklik değerlerine göre değişimi 65

Şekil 5.22. UO_2 yakıt ve % 0,01, % 0,05, % 0,1, % 0,2 oranlı Al_2O_3, CuO ve TiO_2 nanoparçacıklı soğutucu eklenmiş reaktörün keff değişimi 65

Şekil 5.23. UO_2 yakıt ve Al_2O_3 nanoparçacıklı soğutucu eklenmiş reaktörün keff değişimi 66

Şekil 5.24. % 5 ThO_2 yakıt ve % 0,01, % 0,05, % 0,1, % 0,2 oranlı Al_2O_3, CuO ve TiO_2 nanoparçacıklı soğutucu eklenmiş reaktörün keff değişimi 67

Şekil 5.25. % 10 ThO_2 yakıt ve % 0,01, % 0,05, % 0,1, % 0,2 oranlı Al_2O_3, CuO ve TiO_2 nanoparçacıklı soğutucu eklenmiş reaktörün keff değişimi 68

Şekil 5.26. % 15 ThO_2 yakıt ve % 0,01, % 0,05, % 0,1, % 0,2 oranlı Al_2O_3, CuO ve TiO_2 nanoparçacıklı soğutucu eklenmiş reaktörün keff değişimi 68

Şekil 5.27. % 20 ThO_2 yakıt ve % 0,01, % 0,05, % 0,1, % 0,2 oranlı Al_2O_3, CuO ve TiO_2 nanoparçacıklı soğutucu eklenmiş reaktörün keff değişimi 69

Şekil **Sayfa**

Şekil 5.28. Bir yakıt demetinin 1/6 modelinin üstten görünümü 70

Şekil 5.29. Bir yakıt demetinin 1/6 sının görüntüsü 70

Şekil 5.30. 1/6 lık reaktör korunun kanal modellemesi 71

Şekil 5.31. Modellenen bir kanalın akış alanı gösterimi 72

Şekil 5.32. %3,7 zenginlikteki UO_2 yakıt ve % 5, % 10, % 15 ve % 20 ThO_2 içeren yakıt ve sadece su içeren s oğutuculu reaktörün sıcaklık ve DNBR değişimi 73

Şekil 5.33. % 5 ThO_2 yakıt ve % 0,01, % 0,05, % 0,1, % 0,2 oranlı Al_2O_3 nanoparçacıklı soğutucu eklenmiş reaktörün sıcaklık değişimi, % 0,2 oranında nanoparçacık eklenmiş soğutucunun kalite değişimi ve DNBR değişimi 74

Şekil 5.34. % 5 ThO_2 yakıt ve % 0,01, % 0,05, % 0,1, % 0,2 oranlı CuO nanoparçacıklı soğutucu eklenmiş reaktörün sıcaklık değişimi, %0,2 oranında nanoparçacık eklenmiş soğutucunun kalite değişimi ve DNBR değişimi 77

Şekil 5.35. % 5 ThO2 yakıt ve % 0,01, % 0,05, % 0,1, % 0,2 oranlı TiO2 nanoparçacıklı soğutucu eklenmiş reaktörün sıcaklık değişimi, % 0,2 oranında nanoparçacık eklenmiş soğutucunun kalite değişimi ve DNBR değişimi 78

Şekil 5.36. % 10 ThO_2 yakıt ve % 0,01, % 0,05, % 0,1, % 0,2 oranlı Al_2O_3 nanoparçacıklı soğutucu eklenmiş reaktörün sıcaklık değişimi, % 0,2 oranında nanoparçacık eklenmiş soğutucunun kalite d eğişimi ve DNBR değişimi 80

Şekil 5.37. % 10 ThO_2 yakıt ve % 0,01, % 0,05, % 0,1, % 0,2 oranlı CuO nanoparçacıklı soğutucu eklenmiş reaktörün sıcaklık değişimi, % 0,2 oranında nanoparçacık eklenmiş soğutucunun kalite değişimi ve DNBR değişimi 81

Şekil 5.38. % 10 ThO_2 yakıt ve % 0,01, % 0,05, % 0,1, % 0,2 oranlı TiO_2 nanoparçacıklı soğutucu eklenmiş reaktörün sıcaklık değişimi, % 0,2 oranında nanoparçacık eklenmiş soğutucunun kalite değişimi ve DNBR değişimi 83

Şekil 5.39. % 15 ThO_2 yakıt ve % 0,01, % 0,05, % 0,1, % 0,2 oranlı Al_2O_3 nanoparçacıklı soğutucu eklenmiş reaktörün sıcaklık değişimi, % 0,2 oranında nanoparçacık eklenmiş soğutucunun kalite değişimi ve DNBR değişimi 84

Şekil **Sayfa**

Şekil 5.40. % 15 ThO_2 yakıt ve % 0,01, % 0,05, % 0,1, % 0,2 oranlı CuO nanoparçacıklı soğutucu eklenmiş reaktörün sıcaklık değişimi, % 0,2 oranında nanoparçacık eklenmiş soğutucunun kalite değişimi ve DNBR değişimi 86

Şekil 5.41. % 15 ThO_2 yakıt ve % 0,01, % 0,05 , % 0,1, % 0,2 oranlı TiO_2 nanoparçacıklı soğutucu eklenmiş reaktörün sıcaklık değişimi, % 0,2 oranında nanoparçacık eklenmiş soğutucunun kalite değişimi ve DNBR değişimi 87

Şekil 5.42. % 20 ThO_2 yakıt ve % 0,01, % 0,05 , % 0,1 , % 0,2 oranlı Al_2O_3 nanoparçacıklı soğutucu eklenmiş reaktörün sıcaklık değişimi, % 0,2 oranında nanoparçacık eklenmiş soğutucunun kalite değişimi ve DNBR değişimi 89

Şekil 5.43. % 20 ThO_2 yakıt ve % 0,01, % 0,05, % 0,1, % 0,2 oranlı CuO nanoparçacıklı soğutucu eklenmiş reaktörün sıcaklık değişimi, % 0,2 oranında nanoparçacık eklenmiş soğutucunun kalite değişimi ve DNBR değişimi 90

Şekil 5.44. % 20 ThO_2 yakıt ve % 0,01, % 0,05, % 0,1, % 0,2 oranlı TiO_2 nanoparçacıklı soğutucu eklenmiş reaktörün sıcaklık değişimi, % 0,2 oranında nanoparçacık eklenmiş soğutucunun kalite değişimi ve DNBR değişimi 92

Şekil 5.45. UO_2 yakıt % 0,01, % 0,05, % 0,1, % 0,2 oranlı Al_2O_3, nanoparçacıklı soğutucu eklenmiş ve sadece su içeren soğutucunun sıcaklık değişimi 95

Şekil 5.46. % 5 ThO_2 yakıt ve % 0,1 hacim oranlı Al_2O_3, CuO ve TiO_2 nanoparçacık eklenmiş ve sadece su içeren soğutucunun sıcaklık değişiminin karşılaştırılması 95

Şekil 5.47. % 5 ThO_2 yakıt ve % 0,1 oranlı Al_2O_3 nanoparçacıklı soğutucu eklenmiş reaktörün radyal yönde sıcaklık değişimi 97

Şekil 5.48. UO_2 yakıt ve su soğutucu, % 5 ThO_2 yakıt ve su soğutucu ve de %5 ThO_2 yakıt ile % 0,1 oranlı Al_2O_3 nanoparçacıklı soğutucu eklenmiş reaktörün yakıt sıcaklığı değişimi 97

Şekil 5.49. UO_2 yakıt ve su soğutucu, % 5 ThO_2 yakıt ve su soğutucu ve de %5 ThO_2 yakıt ile % 0,1 oranlı Al_2O_3 nanoparçacıklı soğutucu eklenmiş reaktörün zarf (clad) sıcaklığı değişimi 98

Şekil 5.50. UO_2 yakıt ve su soğutucu, % 5 ThO_2 yakıt ve su soğutucu ve de %5 ThO_2 yakıt ile % 0,1 oranlı Al_2O_3 nanoparçacıklı soğutucu eklenmiş reaktörün entalpi değişimi 99

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim **Sayfa**

Resim 3.1. Dünya’ nın ilk VVER reaktörü olan Novovoronezh nükleer reaktörü 21

Resim 3.2. Ermenistan' daki iki VVER-440 reaktörü (1988'de ki Spitak depremine kadar çalışmaya devam etmiştir) 21

Resim 3.3. Finlandiya' daki iki reaktörlü Loviisa VVER-440 (dünyadaki en iyi ömür boyu performans kayıtlarından birine sahiptir) 22

Resim 3.4. Çek Cumhuriyeti' nde ki Temelin Nükleer Santralindeki iki VVER-1000 / V-320 reaktör (ülke elektriğinin % 20'sini sağlamaktadır) 23

Resim 3.5. Çin’de ki 1 ve 2' si AES-91 tipinde olan nükleer güç santrali 24

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler	**Açıklamalar**
cm	Santimetre
g	Gram
Gwd/tU	Gigawatt gün / ton uranyum
K	Kelvin
keff	Etkin çoğaltma katsayısı
kg	Kilogram
Mwd/tU	Megawatt gün / ton uranyum
MWe	Megawatt elektrik
Th	Toryum

Kısaltmalar	**Açıklamalar**
BWR	Boiling Water Reactor
CANDU	CANada Deuterium-Uranium reactor
DNBR	Departure from Nucleate Boiling Ratio
FBR	Fast Breeder Reactor
FSAR	Final Safety Analyses Report
GCR	Gas Cooled Reactors
IAEA	International Atomin Energy Agency
LWGR	Light Water Graphite Reactor
MCNP	Monte Carlo N-Particle
PWR	Pressurized Water Reactor
TAEK	Türkiye Atom Enerji Kurumu
VVER	Vodo-Vodyanol Energetichesky Reaktor

1. GİRİŞ

Dünyada mevcut sınırlı fosil kaynaklar ve bunların bilinen olumsuz yönleri dikkate alındığında, enerji kaynaklarının sürdürülebilirliği önemli bir bilimsel çalışma konusu olmuştur. Sürdürülebilir ve güvenli enerji denince ilk anılan enerji türleri güneş ve rüzgar olsada, çevreye olan zarar ve sağlık etkileri göz önüne alındığında, fosil kaynaklarla karşılaştırılınca, nükleer enerjinin elektrik ve ısı üretimi için kullanımının fazlaca faydası ve avantajı olabileceği ortaya çıkmaktadır.

Tarihsel gelişimine bakıldığında çok da uzun bir geçmişi olmamakla beraber, dünya ülkeleri nükleer teknolojiye hızlı bir giriş yapmış ve nükleer enerjiden elektrik ve ısı üretimi için faydalanmaya başlamışlardır.

Nükleer maddelerin, gerek nükleer reaktörlerde gerekse tıbbi ve endüstriyel kullanımı sonucunda radyoaktif atık oluşumu elbette söz konusu olmaktadır. Enerji üretimi sırasında ortaya çıkan bu radyoaktif atıklar, güvenli, ekonomik ve dünya insanlarının kabul edebileceği bir şekilde yönetilmek zorundadır. Günümüzde gelişen teknoloji ile birlikte nükleer atıkların azaltılması yönünde çalışmalar yapılmakta ve hem atık üretimini azaltmak hem de atıkların güvenli bir şekilde depolanmasını veya yok edilmesini sağlamak amacıyla çeşitli öneriler sunulmaktadır. En fazla atık üretimi nükleer reaktörlerden enerji elde etme sırasında ortaya çıkmakla beraber, en fazla faydayı da yine nükleer reaktörler sağlamaktadır. Diğer kullanım alanlarına kıyasla, nükleer santrallerden enerji üretimi dünya üzerinde oldukça yaygınlaşmakta ve güvenli bir şekilde kullanılmaktadır. Her ülke ve coğrafyada farklı nükleer reaktör türleri mevcut olsada çeşitli özelliklerine göre, nükleer reaktörler birkaç temel kategori altında sıralanabilir.

Günümüzde dünya üzerinde en yaygın kullanılan reaktörler basınçlı su reaktörleri (PWR) olmakla birlikte, kaynar su reaktörleri (BWR) de ikinci sırada bulunmaktadır. Bu iki yaygın kullanılan reaktör türünü, VVER (Vodo-Vodyanoi Energetichesky Reaktor), CANDU (CANada Deuterium-Uranium reactor), GCR(Gas Cooled Reactors), (LWGR Light Water Graphite Reactor) ve FBR (Fast Breeder Reactor) takip etmektedir.

Basınçlı su reaktörleri kendi içinde çeşitlenir ve bunlardan Rus yapımı olan fisyon reaktörleri VVER (Vodo-Vodyanoi Energetichesky Reaktor) nükleer reaktörleridir. VVER bir tür basınçlı su reaktörü olup, isim anlamıyla da su ile soğutulan ve su ile yavaşlatılan su reaktörü olarak açıklanabilir ve diğer ticari basınçlı su reaktörleri ile bazı benzerlikleri ve farklılıkları bulunmaktadır. VVER reaktörleri, 3+ nesil nükleer reaktörler olarak tanımlanıp, VVER-1000 ve VVER-1200 olmak üzere farklı güç kapasitelerine sahiptirler. Bu tip yeni nesil nükleer reaktörlerin geometrik tasarım ya da alternatif yakıt kullanımları durumlarındaki nötronik ve termal performans davranışları incelenmekte ve bir çok araştırmacı tarafından araştırılmaktadır.

Nükleer reaktör tasarım ve güvenlik özellikleri incelenirken, termal analizler ve nötronik analizler ayrı ayrı önem taşımaktadır. Yapılan nötronik çalışmalarda reaktör tasarım parametrelerinde ki değişimler, reaktör geometrisindeki modelleme değişimleri ve farklı hesaplama kodlarının karşılaştırmasını yapmak, alternatif yakıt kullanımı gibi farklılıklar incelenmektedir.

Nükleer reaktörlerin termal incelemeleri yapılırken ise reaktör için büyük önem arz eden, yakıt, zarf ve soğutucu bölgelerinde ki öncelikle sıcaklık değerleri incelenmekte ve güvenlik kriterleri çerçevesinde verimi arttırmaya yönelik çeşitli öneriler getirilmektedir. Bu önerilerden son çalışmalarda öne çıkanı, soğutucu akışkan içinde farklı hacim oranlarında ve farklı türlerde nanoakışkan kullanmaktır.

Bu tez çalışmasında ki öncelikli amaç nükleer reaktörlerde en yaygın kullanılan yakıt olan UO_2 (uranyum dioksit) bileşiminin rezervleri sınırlı ve ekonomik maliyeti fazla olduğu için, UO_2 ‘ye alternatif olabilecek yakıt önerisinde bulunmaktır. Alternatif yakıt olarak, Türkiye’de zengin rezervleri olan Th (toryum) önerilmektedir. Türkiye nükleer teknolojiye Akkuyu’da inşaatı devam eden, Rus yapımı VVER-1200 santrali ile giriş yapacaktır. VVER-1200 reaktörleri, belirli oranlarda zenginleştirilmiş UO_2 ‘i yakıt olarak kullanmaktadır. Th üretken (fertile) bir malzeme olduğu için, nükleer santrallerde tek başına kullanılamayacağından, belirli oranlarda UO_2 ile karıştırılıp, reaktör korunda yakıt olarak kullanılabilir. Bu tez kapsamında Th elementi, reaktör mevcut yakıtına %5, %10, %15 ve %20 oranlarında karıştırılarak, reaktör verimi analiz edilmek istenmiştir. Bu analizler MCNP kodu kullanılarak yapılmıştır.

Tezin ikinci ve en önemli aşamasında ise, yine reaktör verimine etki etmesi hedeflenerek, mevcut soğutucu akışkana (su), çeşitli tür ve oranlarda nano parçacık eklenerek, soğutucunun sıcaklık ve DNBR (Departure from Nucleate Boiling Ratio) oranı incelenmek istenmiştir. Böylece reaktörde güvenlik zaafiyetine sebep olmadan, soğutucu sıcaklığı arttırılırsa, ısıl verim artmış olacağından, reaktör verimi de artmış olacaktır. Nano parçacık olarak Al_2O_3, CuO ve TiO_2 seçilmiş ve herbiri % 0,01, % 0,05, % 0,1 ve % 0,2 oranlarında sırasıyla soğutucuya eklenmiş ve analizleri COBRA-IV PC termal analiz kodu ile yapılmıştır.

Tez kapsamında yakıt olarak toryumlu yakıt ve soğutucu olarak nano parçacıklı soğutucu kullanımı birleştirilerek, kombine bir çalışma yapılmak istenmiş ve özellikle reaktör termal özelliklerinin değişimini incelemek hedeflenmiştir.

2. LİTERATÜR TARAMASI

Bu tez kapsamında bir çok çalışma incelenmiş ve referans alınmıştır. Bu çalışmaların kısa özetleri aşağıda maddeler halinde verilmiştir.

- Hadad ve ark., çalışmalarında nanoakışkanlı soğutucusu olan VVER-1000 reaktörü için nötronik analiz yapmışlardır. Bu çalışmada temel birincil parametrelerin güvenliğini etkileyen sudaki nanoparçacıkların tip ve hacim fraksiyonunun optimizasyonu amaçlanmıştır. Reaktivite değişimi, radyal ve aksiyal lokal pikleme faktörleri (LPPF) ve yakıt kaplamalı nanoparçacık birikiminin sonuçları araştırılmıştır. Alümina, alüminyum, bakır oksit, bakır ve zirkonya gibi ısı transfer özellikleri iyi olan parçacıkler kullanılmıştır. Çalışmanın sonucunda düşük konsantrasyonda (0, 001 hacim oranlı) alüminanın optimum nano parçacık olduğunu göstermişlerdir. (K. Hadad et al., 2010)

- Ghazanfari ve ark., tipik bir VVER-1000 çekirdeği için katı ve dairesel yakıtlar üzerinde soğutucu olarak nanoparçacık etkisini analiz etmişlerdir. Ele alınan nano akışkanlar, su ve Al_2O_3, TiO_2 ve CuO parçacıklarından oluşan çeşitli karışımlardır. Yakıt çubuğu CFD kodu kullanılarak modellenmiştir. Nihai güvenlik analiz raporu (FSAR) ile hesaplanan sonuçların karşılaştırılması, sonuçların diğer çalışmalarla iyi bir uyum içinde olduğunu göstermektedir. Çeşitli yakıt bileşenlerinde radyal ve eksenel sıcaklık dağılımları gösterilmiştir. Sonuçlar karşılaştırılmış ve diğer nanoparçacıklara kıyasla Al_2O_3 nanoparçacıklarının iyi özelliklere sahip olduğu sonucuna varılmıştır. Nano akışkanlar kullanılarak, merkez yakıt sıcaklığı düşürülür ve soğutma sıvısı sıcaklığı artar. Son olarak, katı yakıt yerine halka şeklindeki yakıtın kullanılması nükleer santralin güvenliği ve verimliliği arttıracaktır (Ghazanfari et al., 2016b).

- Faghihi ve ark.,Rus yapımı VVER-1000 tipi reaktörün COBRA kodu ile alt-kanallı termal-hidrolik analizini yapmışlardır. Gerekli güç dağılımı ve sıcak kanal faktörleri MCNP kodu kullanılarak geçmişte yapılan nötronik hesaplamalar ile hesaplanmıştır. Maksimum ve ortalama yakıt sıcaklığı, entalpi, soğutucu sıcaklığı ve yoğunluğu, soğutucu kütle akış hızı ve basınç düşüşü farklı modeller kullanılarak hesaplanmıştır. Eşleştirilmiş nötronik-termal hidrolik hesaplarına dayalı olarak belirlenen en çok derecelendirilmiş kanalın (en sıcak alt kanal) termal-hidrolik hesaplamaları araştırılmış

ve en sıcak alt kanalın sıcaklık, entalpi, kritik ısı ve MDNBR değerleri bulunmuştur. Son olarak, sonuçları analitik yaklaşımlar ve reaktör FSAR ile karşılaştırılmıştır (Faghihi et al., 2016).

- Zarifi ve ark.,çalışmalarının (Zarifi et al., 2013) temel amacı, reaktör çekirdeğine uygulanan nano uygulamaların nötronik simülasyonunu yapmaktır. VVER-1000 reaktörünün nötronik parametrelerinin değişimi, soğutucu olarak farklı nano katılar kullanılarak araştırılmıştır. Mevcut nötronik simülasyonda, çeşitli hacim oranları olan Al_2O_3, Si, Zr, TiO_2, CuO, Ti, Cu ve Ag nanoparçacıklarını içeren su bazlı nano katılar araştırılmıştır. Nanoparçacıkların tip ve hacim oranlarının optimizasyonu reaktörün nötronik özelliklerini etkilemiştir. WIMS ve CITATION kodları kullanılarak elde edilen sonuçlar, Al_2O_3' ün % 0,1'lik hacminin normal çalışma için optimum nanoparçacık olduğunu ve Ag / su nano akışkanının reaktör güvenliği geliştirme aracı olarak kullanılmasının önerildiğini göstermektedir.

- Safarzadeh ve ark., çalışmalarında (Safarzadeh et al., 2014) bir VVER-1000 reaktörünün birincil soğutma sisteminde nanoparçacıkların kullanılmasının termal-hidrolik ve nötronik özelliklerini araştırmışlardır. Uygulanan yaklaşım sonuçları reaktörün son güvenlik analiz raporu (FSAR) ile karşılaştırarak doğrulanmıştır. Kritik borik asit, nispi güç dağılımı, basınç düşüşü ve soğutucu sıcaklık dağılımları su / Al_2O_3 nano akışkan için incelenmiştir. Nanoparçacıkların düşük hacimli oranarında kritik borik asitte yaklaşık % 3'e kadar minimum bir etkiye ve nispi güç dağılımının maksimumda yaklaşık % 2'sine sahip olduğu ve ısı transferinin saf suya kıyasla arttırıldığı gözlenmiştir.

- S. Tóth ve A. Aszódi çalışmalarında, VVER-440 basınçlı su soğutmalı reaktörlerin yakıt gruplarının alt kanallarında (üçgen kafes, P / D = 1,35) akış alanını incelemişlerdir. Ağ çözünürlüğü ve türbülans modelinin etkileri VVER-440 çubuk demetlerinin CFD hesaplamaları için yönergeler elde etmek amacıyla kullanılmıştır. Sonuçlar, deneysel verilerle karşılaştırılmıştır. Yeterli bir ince ızgara kullanan Reynolds stres modelinin, türbülans için doğru bir tahmin sağlayabileceği kabul edilmiştir. Aralayıcı ızgaraların sahip olduğu incelemelere dayanarak alt kanalların çapraz akışları, eksenel hızı ve çıkış sıcaklığı dağılımı üzerinde önemli etkileri olduğundan, CFD hesaplamalarıyla modellenmeleri yapılmıştır (Tóth & Aszódi, 2010b).

- Basınçlı su reaktörlerindeki termal-hidrolik dalgalanmalarının analizi (yerel ve küresel sıcaklık veya yoğunluk dalgalanmalarının yanı sıra birincil ve şarj pompalarındaki dalgalanmalar) çekirdek dinamik parametrelerin (sıcaklık veya yoğunluk reaktivite katsayıları) hesaplanması veya ölçümü farklı uygulamalarla incelenmektedir. Hessam Malmir , Naser Vosoughi çalışmalarında, PWR reaktörlerinde ki termal-hidrolik dalgalanmaları araştırmışlardır. İlk başta, tek fazlı termal-hidrolik gürültü denklemleri (frekans alanında), basitleştirilmiş varsayımlar kullanılmadan orijinal olarak türetilmiştir. Tüm soğutma suyu parametrelerinin dalgalanmaları ve yakıt, boşluk ve kaplamadaki sıcaklık dalgalanmaları, hesaplamalar boyunca dikkate alınmıştır. Sonra türetilmiş denklemler sonlu hacim yöntemi (FVM) kullanılarak ayrılmıştır. Önerilen çözümleme algoritması, tek bir ısıtılmış kanal gürültü hesaplama kodu (SHC-Gürültü) geliştirilerek, PWR yakıt gruplarının kararlı durum ve dalgalanma parametrelerini hesaplayabilir. Geliştirilen SHC-Noise kodu, farklı durumlarda ve senaryolarda karşılaştırılmıştır. Ayrıca, güç geri beslemelerinin etkilerini göstermek için kapalı devre hesaplamaları yapılır. SHC-Noise kodunu doğrulamak için, VVER tipi basınçlı su reaktöründe kararlı durum hesaplamaları durumunda COBRA-EN kodu kullanılarak karşılaştırma yapılmıştır (Malmir & Vosoughi, 2015).

- Maria A., makalesinde yüksek kaliteli hafif su reaktörü (LWR) çoklu fizik uygulamaları ve nükleer yakıt çubuğu modelleri için termal-hidrolik alt kanal kodlarına odaklanmıştır. Gelişmiş termal -hidrolik alt kanal kodu CTF örnek olarak seçilmiştir. CTF, COBRA-TF kodunun bir eski sürümü olan bir koddur. Kuzey Carolina Eyaletinde Reaktör Dinamiği ve Yakıt Modelleme Grubu Üniversite ve Oak Ridge Ulusal Laboratuvarı birlikte CTF kodunu geliştirmektedir. Termal-hidrolik alt kanal modellemesindeki gelişmeler tüm çekirdek çoklu fizik simülasyonları için üç ana kategoride gruplandırılmıştır. İlk kategori alt kanal çekirdek simülasyonlarının verimliliğini artırmak için hızlanma ve paralelleşme ile ilgilidir. İkinci kategori, tahminlerinin doğruluğunu artırmak için modellerin uygulanması ve geliştirilmesi ile ilgilidir. Nötronik kodlarla tamamen örtüşmeye yönelik bağlantı geliştirilmesi ve uygulanması her ikisinin de geliştirilmesine yardımcı olacak alt kanal kodlarının alt kanal hesaplamalarının etkinliği ve doğruluğu ve iyileştirilmesi ise üçüncü kategoriye girmektedir (Avramova, 2020).

- M. Ebrahimian, G.R. Ansarifar çalışmalarında (Ebrahimian & Ansarifar, 2016), VVER-1000 nükleer reaktöründe soğutucu olarak nanoakışkanın termal-hidrolik etkilerini, halka şeklindeki yakıt (annular) için araştırmışlardır. İlk başta, bir VVER-1000 reaktörünün çekirdeği, iç ve dış soğutmalı dairesel yakıtlar ve yakıt çubuklarının termal hidrolik parametrelerini incelemeye uygun dizayn edilmiş ve yakıt çubuklarının termal hidrolik parametreleri analiz edilmiştir. Nötronik bakış açısından, alüminanın düşük konsantrasyonu normal çalışma için en iyi nanoparçacıktır. Bu çalışmada alümina için yakıt demeti, sıcak kanalda CFD (Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği) simülasyon kodları ve termal hidrolik hesaplamalar (maksimum yakıt sıcaklığı, sıvı çıkışı, MDNBR (Nükleer Kaynama Oranından Minimum Uzaklaşma) vb.) kullanılarak simüle edilmiştir. Bu analizin en önemli sonucu, dışdaki soğutucu akışkanın miktarı azalmış olmasına rağmen, ısı transfer katsayısının artmış olmasıdır. Ayrıca, daha küçük boyutlu ve majör konsantrasyonlu nanoparçacık kullanımının MDNBR oranını arttıracağı belirtilmiştir.

- V. Ghazanfari ve ark. yaptıkları çalışmada (Ghazanfari et al., 2016a), tipik bir VVER-1000 koru için soğutucu olarak nano akışkanların katı ve dairesel yakıtlar üzerindeki etkisi analiz edilir. Dikkate alınan nanoakışkanlar su ve suyun Al_2O_3, TiO_2 ve CuO taneciklerinden oluşan çeşitli karışımlardır. Yakıt çubuğu bir CFD kodu kullanılarak modellenmiştir. Hesaplanan sonuçları doğrulamak için, nano akışkan ve saf su içeren katı yakıtın mevcut sonuçları, görsel FORTRAN dili, DRAGON / DONJON kodu, COBRA-EN kodu ile yapılan diğer çalışmalarla ve nihai güvenlik analiz raporu (FSAR) ile karşılaştırılarak doğrulanmıştır. Hesaplanan sonuçların karşılaştırılması, sonuçların diğer çalışmalarla uyumlu olduğunu göstermektedir. Radyal ve eksenel sıcaklık dağılımları çeşitli yakıt bileşenleri için gösterilmiştir. Ayrıca yakıt, kaplama ve soğutma suyunun sıcaklık dağılımları katı yakıt ve halka şeklindeki yakıttaki su bazlı Al_2O_3, TiO_2 ve CuO nanoakışkanlar için tanımlanmıştır. Sonuçlar baz sıvı ile karşılaştırılmış ve Al_2O_3'ün nanoparçacıklarının diğer nanoparçacıklara oranla daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür. Nanoakışkanlar kullanılarak merkezi yakıt sıcaklığının düşürülebileceği ve soğutma suyunun sıcaklığının arttırılabileceği sonucuna varılmıştır. Ek olarak, halka şeklindeki yakıtın ısıtılmış yüzeyleri artırılarak, bu yüzeyler üzerindeki ısı akısı azalır, MDNBR marjı artar ve bu nedenle kritik ısı akısı arttırılabilir. Sonuç olarak, katı yakıt yerine halka şeklindeki yakıtın kullanılması ve ayrıca nano-akışkanların çekirdekte

soğutucu olarak kullanılması, nükleer santralin güvenlik ve verimliliği arttıracaktır sonucu elde edilmiştir.

- Hang Xia ve ark. çalışmalarında (Xia et al., 2019), çift soğutmalı halka şeklindeki yakıt pimlerini modelleyebilen bir Halka Kanal Analiz Kodu (SACAF) geliştirmişlerdir. Soğutucu akış dağılımı, üniform basınç düşüşleri oluşana kadar tüm alt kanallar için ayarlanmıştır. Isı transfer fraksiyonu bir kriter olarak belirlenmiştir. Yakıt pimlerinin sıcaklığı süreklidir ve yanmaya bağlı bir yakıt termal iletkenlik modeli, termal iletkenlik bozulmasının etkisini analiz etmek için koda dahil edilmiştir. Çalışmada, özellikler ve SACAF'ın doğrulanması açıklanmaktadır. Halka şeklindeki yakıtın termal-hidrolik performansı büyük termal-hidrolik parametreler için belirlenmiş ve silindirik yakıt demeti parametreleri ile karşılaştırılmıştır. Aynı güç dağıtımı için, halka şeklindeki yakıt için daha büyük çekirdek kaynama oranı (DNBR) ve silindirik yakıttan çok daha düşük yakıt peleti sıcaklığı elde edilmiştir. Farklı yanma seviyelerinde yakıt pimi sıcaklık profilleri elde edilmiş ve ısıl iletkenliğin etkileri sıcaklık profili ve ısı dağılımı üzerindeki farklı yanma seviyelerinde belirlenmiştir.

- En iyi tahmini termal-hidrolik sistem kodlarının doğrulanması, nükleer santral kaza senaryolarını hesaplamak için uygulanabilirliklerini kanıtlamak için gerekli bir adımdır. Nükleer santral kaza senaryoları için önemli olan fiziksel termal-hidrolik olayların tasarım ve güvenlik analizi amaçları için uygun şekilde hesaplanmış ve analiz edilmiştir. Bu çalışmada (Aksan, 2019), Uluslararası kuruluşlar çerçevesinde, yani Ekonomik İşbirliği ve Kalkınma Teşkilatı (OECD / NEA-CSNI) ve Uluslararası Atom Enerjisi Ajansı (IAEA), farklı ülkelerden gelen kurumların büyük desteği ile, geçerlilik matrislerinin oluşturulması için çalışmalar yürütmüştür. Bu süreçte, faaliyetin ana unsurlarından biri, PWR ve BWR'lerin Ayrı Etkiler Testi (SET) ile analiz edilmesidir. Bu test, termal-hidrolik olayları ve ayrıca test tiplerini karakterize eder. Bu süreç, ilgili bilim adamlarının uzman bilgisine ve farklı ülkelerdeki katılımcı kurum ve kuruluşların çalışmalarına dayanmaktadır. Ek olarak, termal-hidrolik olayların tanımlanması ve karakterizasyonu VVER'ler için gerçekleştirilmiştir. Bu yazıda, yaklaşık 8 gelişmiş su soğutmalı reaktör tasarımı (AP1000, APR1400, EPR, ESBWR, ABWR, SWR-1000 (KARENA), Küçük Modüler Reaktörler (örn. SMART, MASLWR CAREM) düşünülmüştür. ALWR'ler ve SCWR'ler için termal-hidrolik fenomenler OECD / NEA-CSNI ve IAEA belgelerinden toplanmıştır. Bu belgelerde kor çekirdek bütünlüğünün

yitirilmesinden önce meydana gelen kaza veya olayların tasarımı kapsayan incelemeler yapılmıştır.

- Ghahdarijani ve ark. yaptıkları çalışmada (Ghahdarijani et al., 2017), nano akışkanın reaktördeki soğutma performansında ve basınç düşmesi üstündeki etkisini incelemişlerdir. Reaktörün içinde kullanılan soğutucu akışkana Al_2O_3 ve CuO ilave edilmiştir. Çift duvarlı bir reaktörün performansını tahmin etmek için yapay sinir ağlarının (YSA) uygulanması çalışılmıştır. Konvektif ısı transferi ve nanoakışkanların basınç düşmesini tahmin edebilmek için yapay sinir ağlarının farklı mimarileri geliştirilmiştir. Deneysel sonuçlar eğitim ve test için kullanılmıştır. Farklı ağların istatistiksel kriterlerinin karşılaştırılması göstermiştir ki, konvektif ısı transfer katsayısının öngörülmesi için en uygun yapı, bir gizli katman ve 10 nöron içeren, Levenberg – Marquardt (LM) algoritması ile yetiştirilen MLP ağıdır. Elde edilen sonuçlar yapılan deneylerle de uyum göstermiştir.

- Bu çalışmada, hafif su nükleer reaktörünün ilk çalışma döngüsü sırasında bir soğutma sıvısı ve bir reaktivite kontrolörü olarak su / gümüş nanoakışkan seçiminin etkileri incelenmiştir. Bunu başarmak için, reaktör çekirdeğini simüle etmek için nötronik-termo-hidrolik analiz kullanılmıştır. Ayrıntılı bir VVER1000 / 446 reaktör çekirdeği monte carlo kodunda (MCNP) modellenmiştir ve gözenekli ortam yaklaşımı (porous media) kullanılarak model doğrulanmıştır. Sonuçlar, gümüş nanoparçacıklarının gereken maksimum seviyesinin, döngünün başlangıcında hacim olarak %1,3 oranında olduğunu göstermiştir, bu değer döngü sonunda sıfıra düşmüştür. Maksimum güçte reaktör çalışma süresi 357,3 güne uzamış ve enerji üretimi yaklaşık % 27,3 artmıştır. Nanoakışkan varlığında güvenlik marjları göz önüne alındığında, DNBR(minimum departure from nucleate boiling ratio) oranının 2,16 olduğu hesaplanmıştır (Saadati et al., 2018).

- Nükleer güç santrallerinde çalışmayı etkileyecek en etkili belirleyiciler güvenlik faktörleridir. Güvenlik faktörleri ile ilgili analizleri yapacak birçok model geliştirilmiş ve hala da geliştirilmeye devam etmektedir. Bu nedenle, mevcut çalışmanın amacı, bulanık uzman sistem (FES) modelinin nükleer reaktör gibi karmaşık bir sisteme uygulanarak, nükleer sistemin termal analizini yapmak ve sıradışı bir durumda erken tahminde bulunmaktır. Reaktör dizayn parametreleri, güvenlik fonksiyonları, zarf

malzemesinin iletkenliği, soğutucu malzemenin ısı transfer özelliği gibi parametreler arasındaki bağlantıyı açıklamak çalışmanın bir diğer amacıdır. Çalışma sonucunda, nükleer santralin FES tabanlı verimlilik analizi, PCTran analizi ile karşılaştırılmıştır. PCTran'da normal çalışma verimliliği %99 olarak bulunmuştur. Bu çalışmanın nükleer santral arızalarını analiz etmek için çok yardımcı olabileceği sonucuna varılmıştır (Hossain et al., 2019).

- Bu çalışmada, Monte Carlo nötron taşıma kodu TRIPOLI ile akışkanlar dinamiği kodu CFX ile birleştiren JSI TRIGA Mark II' nin yeni bir hesaplama modeli ve bir dizi yeni deneysel veri seti oluşturulmuştur. Monte-Carlo tranport kodu ve CFD kodu arasındaki iletişime izin vermek için alt programlar geliştirilmiştir. Reaktörün verilen termal gücü için, soğutucu kanallarında ki sıcaklıklar ölçülmüştür. Ardından, soğutucu akışkan kanallarında ki eksenel sıcaklık profilleri, kararlı durum çalışması sırasında yeni geliştirilmiş bir sensör ile ölçülmüştür. Eşleştirilmiş modelin tahminleri, kaydedilen deneysel verilerle beklenen uyum içinde bulunmuştur (Henry et al., 2017).

- Bu yazının temel amacı, gelişmiş Küçük Modüler Reaktör (SMR) için yakıt kanalının nötronik-termal hidrolik bağlantı analizidir. SMR reaktörleri yakın dönemde IV. nesil reaktör olmaya aday görülmektedir. Altıgen ve kare yakıt demetleri dikkate alınarak, reaktör çekirdeğindeki yakıt gruplarının, sıcak ve ortalama nötronik-termal hidrolik incelemesi MCNPX ve CFX kodları kullanılarak yürütülmüştür. Hesaplanan güç zirve faktörleri (power peaking factor) ve doğrusal güç yoğunlukları, yakıt çubuklarının PWR ile iyi bir uyum içinde olduğunu göstermiştir. Bu sonuçlar yakıt kanallarının çalışmaları ve güvenlik analizlerini yapabilmek için daha fazla termal hidrolik analizde kullanılabilir olarak belirlenmiştir (Erfaninia et al., 2017).

- Akış alanı, VVER-440 basınçlı su soğutmalı reaktörlerin yakıt gruplarının alt kanallarında incelenmiştir. Ağ çözünürlüğü ve türbülans modelinin etkileri VVER-440 yakıt demetlerinin CFD hesaplamaları için yönergeler elde etmek amacıyla kullanılmıştır. Sonuçlar deneysel çalışmalarla karşılaştırılmıştır. Alt kanalların çapraz akışları, eksenel hızı ve çıkış sıcaklığı değerlerinin, sonuçlar üzerinde üzerinde önemli etkileri olduğu için, CFD hesaplamalarında tatmin edici bir şekilde modelleme yapılması önerisinde bulunulmuştur (Tóth & Aszódi, 2010a).

- Birden fazla döngüye sahip basınçlı su reaktörü (PWR), soğutma sıvısı pompalarının bazı döngülerde çalışmadığı durumlarda anormal çalışma koşullarına sahip olabilir. Bu makalede, dört döngülü VVER-1000 PWR basınçlı reaktör modelinin hesaplamalı bir akışkan dinamiği (CFD) ile sayısal analizi sunulmuştur. Basınçlı kalpteki termo hidrodinamik özelliklerin sayısal simülasyonları, sırasıyla dört ve üç döngü çalışarak farklı giriş koşullarında gerçekleştirilmiştir. Normal kararlı durum koşullarında (dört döngülü çalışma), reaktör girişinde farklı parçalar arasında basınç kayıpları, reaktör basınç kabındaki (RPV) basınç, hız ve sıcaklık dağılımları ve soğutucu akışkanın kütle akış dağılımını gibi farklı parametreler elde edilmiştir. Basınç kayıpları için elde edilen sonuçlar, VVER-1000 Tianwan nükleer santralinde ki deneysel referans değerleri ile eşleşmiştir (Cheng et al., 2016).

- Nükleer enerji santrallerinde verimliliği artırmak ve enerji tüketimini azaltmak için uygulanan sistemlerde ısı transferi geliştirilmeye çalışılır. Bu nedenle, su gibi geleneksel sıvılar yerine daha uygun termal özelliklere sahip alternatif bir akışkanın uygulanması için araştırmalar yapılmıştır. Nanoparçacıkların en önemli avantajı termal iletkenliği arttırması ve ısı transfer katsayısıdır. VVER-1000 reaktörünün dinamik parametreleri üzerinde ki nanoakışkan etkilerini görmek için, yazarlar yakıt ve soğutucu sıcaklık katsayılarını hesaplamışlardır. Bu çalışmada, farklı hacimsel yüzdeler ve boyutlarda Al_2O_3 (alümina) nanoparçacık kullanılarak, dinamik reaktör parametreleri dahil VVER-1000 reaktörünün önemli ve temel parametreleri hesaplanmıştır (Kianpour & Ansarifar, 2019).

- Bu çalışmada, Al_2O_3 nanoparçacıklı tipik bir VVER-1000 reaktörü için iki grup difüzyon denklemleri çözülmeye çalışılmıştır. Difüzyon denklemleri, sıfırıncı dereceden üç boyutlu bir altıgen hacim için ortalama akım düğüm genişletme yöntemi (ZACNE) ile ayrılır. Kesitler, soğutma sıvısındaki farklı hacimdeki nanoparçacık fraksiyonları için WIMS-D5 kodu uygulanarak hesaplanır. Sonuçlar göstermektedir ki VVER-1000 reaktöründe Al_2O_3 nanoparçacıklarının hacim oranı artışıyla, reaktörün çekirdek merkezindeki bağıl güç dağılımı azalır ve çekirdek etrafındaki güç dağılımı ise artar. ZACNE kodu uygulanarak elde edilen nihai sonuçlar, Al_2O_3'ün % 0,1'in altındaki hacim fraksiyonunun normal çalışma için optimum olduğunu ortaya çıkarmıştır (Nourollahi et al., 2019).

- Tipik bir VVER-1000 çekirdeğinin kararlı durumda termal-hidrolik analizi, COBRA-EN kodu kullanılarak sunulmaktadır. Gerekli güç dağılımı WIMS-D4 ve CITATION kodlarıyla nötronik hesaplamalara dayanarak hesaplandı. Maksimum ve ortalama yakıt sıcaklığı, entalpi, boşluk oranı (void fraction), soğutma sıvısı sıcaklığı ve yoğunluğu, soğutma sıvısı kütle akış hızı ve basınç düşüşü EPRI modeli kullanılarak hesaplanmıştır. En sıcak kanal, reaktör termal özellikleri incelenerek belirlenmiş ve VVER reaktörü için termal hidrolik analiz yapmak için COBRA- EN kodu modifiye edilmiştir. Sonuçlar, analitik yaklaşımlar ve FSAR raporlarıyla karşılaştırılmıştır (Safaei Arshi et al., 2010).

- VVER nükleer reaktörünün tipik altıgen yakıt grubunun termal-hidrolik alt kanal analizi, sabit durum veya geçici koşullarda yakıt çubuklarının ve alt kanalların detaylı geometrisinin dikkate alınmasını gerektirir. COBRA-EN kodu, altıgen alt kanal ve yakıt-alt kanal bağlantılarını oluşturamadığı için, kullanıcı her alt kanalın komşusu için gerekli tüm verileri manuel olarak girmelidir. Bu nedenle, kullanıcı altıgen yakıtın tam geometrisini hazırlamalıdır. COBRA-EN kod yeteneğini geliştirmek için otomatik altıgen alt kanal üretimi ve güç dağıtım şemaları geliştirilmiş ve uygulanmıştır (Aghaie, Zolfaghari, Minuchehr, & Norouzi, 2012).

- Hafif su nükleer reaktörlerinde bir kaza olması durumunda, nükleer güvenlik acil kor soğutma sisteminin (ECCS), çekirdek içindeki yakıt elemanlarının sıcaklığını güvenli sıcaklık sınırları içinde tutması oldukça önemlidir. Bu çalışmanın temel amacı, acil durum kor soğutma sistemindeki sıcak çekirdeğin sıcaklığını düşürmek için ve çekirdeğin erimeye karşı korunması için soğutma sıvısı olarak nanoakışkan kullanılmasıdır. % 0,001 ile % 10 arasında değişen hacim oranlarında Al_2O_3, TiO_2, Cu, CuO, Gd_2O_3, CdO ve HfO_2 nano parçacıkların ,etkin çoğaltma faktörüne etkisi incelenmiş ve borik asit etkisi ile karşılaştırılmıştır. Nötronik hesaplamalar için MCNPX kodu kullanılmıştır. Referans kor modeli için Bushehr nükleer reaktörü (VVER-1000) seçilmiştir. Nötronik, ekonomik ve korozyon çalışmaları sonucunda, HfO_2 nano akışkanının, acil soğutma suyu sistemi için diğer nano akışkanlara göre daha verimli olduğu sonucu elde edilmiştir (Nematolahi et al., 2015).

- Tamas Janos Katona, "Long-Term Operation of VVER Power Plants" isimli çalışmasında, VVER nükleer tesislerinin uzun süreli çalışabilmesinin sağlanması için

yaptığı çalışmalar sonucu bazı önerilerde bulunmuştur. Genellikle, şimdiye kadar kabul edilen prensiplerin uygulanması uygun görülmüştür. Sistemler ve bileşenleri için, uzun dönemli çalışmada ki önem anlatılmıştır. Uzun vadeli operasyonun hazırlanması ve gerekçelendirilmesi için, en iyi uluslararası uygulama ve en gelişmiş yöntemler uygulanmıştır. VVER tasarımları yapılırken, ulusal tasarım özellikleri ve mevcut tesis uygulamaları dikkate alınarak, yaratıcı bir şekilde uyarlanması önerisinde bulunmuşlardır (Janos, 2011).

- Nükleer santral analizlerine uygulandığında, ölçülen tesis verilerine göre termal-hidrolik sistem kodlarının doğrulanması ve nitelendirilmesi santrallerin güvenilirlikleri için esastır. Bu amaç için, Karlsruhe Teknoloji Enstitüsü'nde (KIT) Nötron Fiziği ve Reaktör Teknolojisi (INR bölümünde), farklı CFD, alt kanal ve sistem kodlarının çeşitli doğrulama ve yeterlilik faaliyetleri yapılmaktadır. Bu çalışmada, BWR geçici durum analizleri için, çok ölçekli termal-hidrolik yaklaşıma (alt kanal ve sistem kodları kombinayonu) odaklanılmıştır. ATHLET / COBRA-TF arasındaki termal-hidrolik bağlantı yönteminin bir açıklaması verilmiştir. Çok ölçekli termik-hidrolik çifti, SALOME platformu içerisinde MEDCoupling arabirimi için uygulanmıştır (Jimenez Escalante et al., 2017).

- Nükleer reaktör çekirdeklerindeki akış koşullarını tahmin etmek için AREVA Nükleer Santralinin termal hidrolik departmanında farklı simülasyon ölçekleri uygulanmış ve bir (veya daha fazla) yakıt grubunu alt kanal olarak gören kodlar incelenmiştir. Alt kanal kodları her kanalda ki radyal düğümü tek tek çözer. CFD kodları, bir alt kanaldaki yerel akış koşullarını çözmek için çok daha ince bir ayrıklaştırma kullanır. Yazılım şirketi, son zamanlarda endüstriyel ihtiyaçlara göre termal hidrolik kodları yelpazesini özelleştirdiği için, bu çalışmanın ana odağı, gelişmiş alt kanal kodu F-COBRA-TF'dir. Ayrıca, çok fazlı CFD uygulaması hakkında yakıt demeti optimizasyonu hakkında bilgi verilmiştir (Glück, 2007).

- IV. Nesil Uluslararası Forumu (GIF) programında, süperkritik su reaktörü (SCWR) konsepti yakın gelecekte geliştirilmesi için seçilen altı yenilikçi reaktör tipi arasında yer almaktadır. Prensip olarak yüksek verimlilik ve daha iyi ekonomi SCWR konseptini mevcut reaktör tasarımları ile rekabetçi hale getirir. Bununla birlikte, var olan farklı teknik zorluklar nedeniyle, yakıt demeti tasarımı çok önemli hale gelmektedir. Özellikle

büyük yoğunluk değişimleri, düşük soğutma, ısı transfer geliştirme ve bozulma çekirdek tasarım parametreleri üzerinde güçlü bir etkiye sahiptir. Sadece birkaç hesaplama aracı, şu anda süperkritik reaktörlerde alt kanal termal-hidrolik analizi yapabilmektedir. JRC-IE'de mevcut COBRA-EN alt kanal kodu, suyun kritik basıncının üstünde çalışacak şekilde geliştirilmiştir. IAPWS Endüstriyel Formülasyonunun, su özellikleri paketi, su ve buharın termodinamik özelliklerini hesaplamak için COBRA-EN' ye entegre edilmiştir. Suyun kritik üstü bölgesi için daha fazla ısı transferi ve basınç düşümü korelasyonları da koda dahil edilmiştir. COBRA-EN, hidrit yakıtın kullanımını araştırmak için nötronik kod MCNP ile birlikte uygulanmıştır. Sonuçlar COBRA-EN'in kullanılabilir olduğunu göstermiştir (Ammirabile, 2010).

- İki fazlı akış rejiminde belirli bir boşluk fraksiyonu değerine ulaşıldığında, buhar boşluğu fraksiyon sapmaları büyük değerlere ulaşabildiğinden ya da belirlenenden daha fazla parametre fiziksel olarak olması gereken değerde olmadığından COBRA-EN kodunda bir problem görülür. Bu sorun, drift-flux modeli seçeneğinde gözlenmiş ve kod yürütülmesini durdurmuştur. Sorunu çözmek için iki çözüm önerilmiştir. İlki entalpiyi her zaman pozitif olması için zorlar ve diğeri buhar boşluk katsayısı hesabında bir gevşeme faktörü kullanmasıdır. İki yaklaşımda problemi çözmede başarılı olmuştur (Braz Filho et al., 2005).

- Operasyonel deneyimdeki artış, bazı operasyonel kısıtlamaların revize edilmesini gerektiğini ve yüksek performanslı bilgisayarların ve hesaplama yöntemlerinin gelişmiş güvenlik marjları için kullanılabilirliğini göstermiştir. Araştırma reaktörlerindeki plaka tipi yakıtları incelemek için, COBRA-EN kodu kullanılmıştır. Kodda ki ısı transfer katsayısı modeli, sıcak kanal verilerini alabilmek için modifiye edilmiştir. Plaka tipi yakıtlar içeren Tahran Araştırma Reaktöründe şebeke kazasının olması durumunda çekirdek simüle edilmiştir. Reaktörün güvenlik analizi raporu ile sonuçların tutarlılığı, geliştirilen kodun güvenilirliğini göstermektedir (Aghaie, Zolfaghari, Minuchehr, Shirani, et al., 2012).

- Alt kanal analizleri, reaktörlerin termal hidrolik analizlerini yapabilmek için oldukça önemlidir. Süperkritik su soğutmalı reaktörlerde (SWCR), alt kanal analizleri yakıtın düzenli olmayan dağılımından dolayı, iyice önem kazanmaktadır. Kritik üstü su reaktörü-yakıt yeterlilik testinde (SCWRFQT) yerel termal-hidrolik parametreleri

analiz etmek, COBRA-SC kodu ile mümkün olmaktadır. Bazı yeni modeller, ör. eksenel ve çevresel ısı iletim modeli, türbülanslı karıştırma modelleri, basınç sürtünme modelleri ve ısı transferi korelasyonlar, COBRA-SC koduna dahil edilmiştir. Sonuçlara dayanarak, SCWR demetinde akış blokaj fenomenin tanımı yapılmıştır. Sonuçlar, yakıt düzeneğindeki tıkanmadan kaynaklanan pik kaplama sıcaklığının SCWR-FQT'nin güvenlik önlemleri ile etkin bir şekilde azaltılacağını göstermektedir (Liu et al., 2013).

- Bir diğer çalışmada, sıvı parçacık soğutmalı reaktörler (LMR) için kapsamlı bir çalışma yapılmıştır. LMR tasarımı için zorluklardan biri, kaplama sıcaklığını tasarım sınırının altında tutmaktır. Böylece, soğutma sıvısı ve yakıt kaplama sıcaklığı için doğru tahmin çok gereklidir. Bu çalışmada, bir alt kanal analiz kodu olan COBRA-LM, sıvı parçacık reaktörünün termal-hidrolik analizi için geliştirilmiştir. COBRA-IV koduna göre, COBRA-LM'nin geliştirme çalışmaları iki adıma ayrılabilir. İlk olarak, sodyum ve kurşun-bizmut özellik hesaplaması tanıtılır; ikinci olarak, basınç düşümü modelleri, türbülanslı karıştırma modelleri ve ısı transfer korelasyonları araştırılır ve koda uygulanır. Kodun doğru olduğunu göstermek için karşılaştırmalar CFX, MATRA-LMR ve ORNL-19 test verilerinin sonuçları ile yapılır. Sonuçlara göre, bir LMR'nin alt kanal analizi için güvenilir bir araç geliştirilmiş ve PHENIX reaktörü için bir analiz COBRA-LM kodu ile simüle edilmiştir (Liu & Scarpelli, 2015).

- Mohammed S. Dwiddar ve ark. çalışmalarında, toryumun güvenlik önlemleri açısından üstünlüğüne ve toryumun bir yakıt olarak alternatif olduğuna değindikleri çalışmalarında, uranyum yakıtla karşılaştırıldığında daha düşük minor aktinit üretmesinden dolayı daha kullanışlı olduğu sonucuna varmışlardır. Nükleer yakıtın bir parçası olarak toryumun etkisini, VVER-1200 birinci çekirdeğinin nötronik parametreleri üzerinde incelemişlerdir. İki farklı model, yani karışık toryum uranyum yakıtı ve tohum battaniyesi yakıtı karşılaştırıldı. Yerleştirilen toryum miktarına göre, toryum düzeneklerinin reaktör çekirdeği içindeki konumu, etkili çarpım faktörü ve dolayısıyla çekirdek döngü uzunluğu bulunmuştur. En iyi konumun, toryumun çekirdeğin çevresine yerleştirildiği konum olduğu bulunmuştur. Özellikle toryum bolluğunun yüksek olduğu bir ülke için uranyum-toryum yakıtlarının kullanımının avantajlı olacağı sonucuna varmışladır (Dwiddar et al., 2015).

- Jan Frybort çalışmasında, toryum yakıtın uranyum yakıta göre nükleer santrallerde alternatif olabileceğini vurgulamıştır. U-Th yakıtında, nükleer atıklarda ki küçük aktinitlerin varlığının önemsizleşeceğini belirtmiştir. Monte Carlo hesaplaması yapan MCNP kodu ile VVER-1000 reaktöründe, toryum yakıt tüketimini incelemiştir. Hesaplanan aktinit bileşimleri ve gama radyasyonundan oluşan doz değerleri, uranyum yakıtla karşılaştırılmıştır ve radyolojik zararların iki yakıt için karşılaştırılması yapılmıştır (Frybort, 2014).

- Nükleer teknoloji temelde, bölünebilir (fissile) ^{235}U ve ^{239}Pu izotoplarının yakıt olarak kullanımına dayanmaktadır. Doğal toryum izotopu ^{232}Th, bir termal nötron yakalama (thermal neutron capture) reaksiyonunun ardından, bölünebilir (fissile) ^{233}U izotopuna dönüşmektedir. Yakın zamana kadar, doğada toryumun varlığı ve nükleer teknolojideki potansiyel kullanımı maalesef yeterli bir öneme sahip değildi. Bunun en önemli nedeni toryum kaynaklarının jeolojik konumu idi. Genellikle gelişmiş ülkeler Uranyum rezervine sahip olsa da , Brezilya, Mısır ve Türkiye gibi gelişmekte olan ülkelerde de toryum rezervi toplam küresel rezervin yaklaşık %70'ini oluşturmaktadır. Şimdiye kadar yapılan çalışmalar, aslında toryumun dünya üzerinde mevcut olan birçok reaktör korunda yakıt olarak kullanılabileceğini ortaya koymuştur (Ünak, 2000).

- Kang ve arkadaşları (Kang et al., 2006) gümüş nanoparçacıklar ve saf su kullanarak teşkil ettikleri nanoakışkan ile yaptıkları deneysel çalışmada; saf su kullanımına göre 10 nm nanoparçacıklar kullanıldığında ısıl dirençte %50 ve 35 nm çaplı nanoparçacıklar kullandıklarında %80 oranında azalma olduğunu belirlemişlerdir.

- Bir diğer çalışmada (Hassan et al., 2015), ısı borularında nano parçacık etkileri gözlemlemek için yapılmıştır. Hacimce % 1, 2 ve 3 alümina nanoparçacıklara sahip su bazlı nanoakışkanlar hazırlanmış ve karakterize edilmiştir. Bu nanoakışkanlar, bakır borudan yapılmış ve gözenekli bir fitil ile kaplanmış tam bir vakumlu bakır ısı borusuna yüklenir. Isı borusu, farklı çalışma koşulları altında performansını değerlendirmek için bir vakum basıncı ve sıcaklık sensörleri ile donatılmıştır. Başlangıçta, ısı borusu performansı nanoakışkanların saf su üzerinde kullanılması için önemli bir gelişme gösterdi. Bu geliştirme, birkaç kez kullanıldıktan sonra daha sonra amortismana tabi tutulmuş ve suyun faz değişimine bağlı olarak baz sıvıda nanoparçacık süspansiyon

stabilitesinin kararlılığı endişesini artırmıştır. Tekrarlı kullanımdan sonra ısı borusu fitili için tarama elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri alınmış; görüntüler, fitil gözenekli yüzey üzerinde birikmiş bir kümelenmiş nanoparçacık tabakasını ortaya çıkarmıştır. Bu parçacık kümeleri, ısı borusu performansını etkileyen ciddi bir kılcal ve termal direnç geliştirmiştir.

- Bir başka çalışmada (Mousavizadeh et al., 2015), yine nanoparçacıkların ısı transferi üzerindeki etkileri incelenmek istenmiştir. Bunun için VVER-1000 nükleer reaktörünün modellemesi CFD ile yapılmış ve nano akışkan olarak TiO_2 /su karışımı kullanılmıştır. Maksimum yakıt sıcaklığı ve MDNBR (Minimum Departure from Nucleate Boiling Ratio) değerleri incelenmiştir. Analizin en önemli sonuçlarından biri olarak, nanoakışkan kullanımı ile MDNBR değeri azalırken, ısı transfer ve ısı iletkenlik katsayısının artması olmuştur.

3. NÜKLEER REAKTÖRLER

Nükleer enerji santralleri, reaktör kalbinde üretilen ısıyı elektriğe dönüştüren santrallerdir. Geleneksel buhar türbinleri elektrik jeneratörünü çalıştırmak için kullanıldığında, diğer donanımla bağlantılı olan reaktör bir nükleer buhar besleme sistemi (NSSS) oluşturmaktadır.

Bir nötron zincir reaksiyonu için tek şartın yeterli miktarda bölünebilir çekirdek olmasına rağmen, işlevsel bir nükleer reaktör kurmak için, malzeme ve düzenimlerin pek çok kombinasyonu kullanılabilir. 1942' de ilk reaktör kullanıma başlandığından bu yana birkaç farklı tipte reaktör tasarlanmış ve test edilmiştir. Buhar, içten yanmalı, pistonlu, döner, jet gibi çeşitli motorlar kullanılmıştır. Reaktörler için genel sınıflandırma şeması, reaktör türlerinin ayırt edici özelliklerine bağlı olarak geliştirilmiştir ve Çizelge 3.1' de gösterilmiştir.

Çizelge 3.1. Reaktör türü ve özellikleri

	YAKIT	YAVAŞLATICI	SOĞUTUCU	ADET
PWR	Zenginleştirilmiş UO_2	Su	Su	214
BWR	Zenginleştirilmiş UO_2	Su	Su	58
VVER	Zenginleştirilmiş UO_2	Su	Su	50
CANDU (PHWR)	Doğal UO_2	Ağır su	Ağır su	48
LWGR	Zenginleştirilmiş UO_2	Grafit	Su	15
GCR	Doğal U (parçacık), zenginleştirilmiş UO_2	Grafit	Karbondioksit	16
FBR	PuO_2 and UO_2	-	Sıvı sodyum	2

Çalışır durumda veya inşaatı devam eden çoğu reaktörün amacı, ticari elektrik enerjisi üretmektir. Diğerleri ise eğitim ve radyasyon araştırma ihtiyaçlarına hizmet etmektir ve çoğu gemiler ve denizaltılar için itme gücü sağlamaktadır. Yeni tasarım geliştirmelerinin değişik aşamalarında, yapılabilirlik testlerinin incelendiği ön model reaktör (prototip) ve ticari olanakların değerlendirildiği tanıtım reaktörünün her ikisi de inşa edilebilir.

Nükleer reaktörlerden ilk ticari elektrik üretimi 1954 yılında 5 MWe güce sahip Obninsk nükleer reaktöründe (RBMK tipi) Sovyetler Birliği tarafından gerçekleştirilmiştir. Bu ilk ticari üründen sonra, ticari boyutta reaktörler 1963-1964 yıllarında işletmeye alınmıştır.

1980'lerin ortasında 25 adet nükleer güç reaktörüne sahip olan Sovyetler Birliği, şimdiki adıyla Rusya Federasyonu, günümüzde 23084 MWe toplam kurulu güçteki 32 adet nükleer reaktöre sahip olmakla birlikte ve elektrik enerjisi üretiminin %17'sini nükleer santrallerden sağlamaktadır (ROSATOM, 2015).

Ayrıca dünya genelinde toplam kurulu kapasite 372,006 GWe olup, dünya elektrik üretiminin yaklaşık % 14'ünü karşılamaktadır.

3.1. VVER Nükleer Reaktörü ve Çalışma Prensibi

Rus yapımı, VVER (Voda- Vodyanoi Energetichesky Reaktor) tipi reaktörlerin ilk üretimi 1970'lere dayanmaktadır. 1. Nesil (Gen I) olarak adlandırılan ilk VVER' ler, 440 MWe güç üreten VVER-440 güç reaktörleridir. 1980'li yıllarda, 3. Nesil (Gen III) olarak adlandırılan 1000 MWe güce sahip VVER-1000 tipi nükleer reaktörler üretilmeye başlanmıştır. Bilindiği üzere bir diğer reaktör tipi Türkiye Cumhuriyeti ve Rusya Federasyonu arasında imzalanan Türkiye' de kurulacak olan 3+ Nesil (Gen III-IV) olarak adlandırılan 1200 MWe güce sahip VVER-1200 tipi nükleer reaktörleridir. Akkuyu sahasında kurulması planlanan 4 adet nükleer reaktör, VVER- 1200 tipi 3-4 Nesil (Gen III-IV) nükleer reaktördür. VVER-1200 tipi reaktörler, işletimde olan VVER-1000 tipi reaktörlerin mevcut işletme ömrü, gücü, termal verimi ve güvenlik sistemleri artırılmış modelleridir.

1960'lardan beri toplam 67 VVER reaktör inşa edildi. İlk VVER ünitesi Rusya'nın Voronezh bölgesinde, 1964'te Novovoronezh nükleer reaktörü devreye alındı. (Rsim 3.1) İlk ünite V-210 olarak adlandırıldı, ikincisi ise V-365 olarak isimlendirildi (sayılar başlangıçta elektrik çıkışına karşılık geliyordu). O zamandan beri Novovoronezh nükleer reaktörü yeni VVER santralleri için bir test alanı oldu. Bu yüzden günümüzde, ROSATOM firması taahhüdünü 'Sadece evde iyice test edilen teknolojiyi dışa aktarın.' yaklaşımıyla sürdürmektedir (ROSATOM, 2015).



Resim 3.1. Dünya’ nın ilk VVER reaktörü olan Novovoronezh nükleer reaktörü

3.1.1. VVER-400

Bu ilk birimlerin başarılı bir şekilde işletmeye alınması ve işletilmesi, sonraki daha güçlü reaktörlerin gelişiminin temelini oluşturmuştur. İlk olarak aynı yerde uygulanan VVER-440, seri bazda inşa edilen ilk VVER'lerden biriydi. VVER-440 ünitelerinde birçok Avrupa ülkesinde güvenle çalışmaya devam etmektedir. Bu ülkeler; Slovakya (Bohunice 1-4, Mohovce 1-2), Macaristan (Paks 1-4), Bulgaristan (Kozloduy 1-4), Çek Cumhuriyeti (Dukovany 1-4) ve Finlandiya (Loviisa 1-2). Fin Loviisa'nın tasarımı, US AEC kurumunun Nükleer Santraller İçin Kriterler konusunda Genel Tasarım ilkeleri dikkate alınarak, 1971-72’ de tamamlandı (Resim 3.3). Bu ABD kriterleri bütün ikinci nesil PWR'ler için standart hale geldi ve dolayısıyla güvenlik özellikleri VVER-440 ünitelerinin ve diğer PWR tiplerinin çalıştırılması için oldukça benzer hale geldi.



Resim 3.2. Ermenistan' daki iki VVER-440 reaktörü (1988'de ki Spitak depremine kadar çalışmaya devam etmiştir)



Resim 3.3. Finlandiya' daki iki reaktörlü Loviisa VVER-440 (dünyadaki en iyi ömür boyu performans kayıtlarından birine sahiptir)

3.1.2. VVER-1000

VVER-1000 üretme kapasitesinin yanı sıra birçok güvenlik inovasyonunu da geliştirdiği için bir dönüm noktası olmuştur. VVER 1000 dünya çapında en yaygın VVER tasarımıdır, günümüzde mevcut 31 ünite çalışmakta ve 500 reaktör yıllık çalışma ömrü mevcut bulunmaktadır. Çalışan VVER-1000 tesisleri genellikle üç geniş grupta sınıflandırılmıştır;

- "Pilot tesis", 1980 yılında işletmeye alınan Novovoroneh 5 reaktörü,
- 1983-86'da işletmeye alınan dört ünitenin "küçük serileri",
- 1985-2011 yılları arasında hizmete giren 23 adet "standart seri".

Bu standart seri VVER-1000 tesislerinin V-320 denilen tasarımı, 1980lerin ilk yıllarında tamamlandı ve Rusya ve Ukrayna' da ki 8 tesiste uygulandı ve ayrıca Bulgaristan'da (Kozloduy 5-6) ve Çek Cumhuriyetinde de (Temelin 1-2) uygulandı (Resim 3.4). VVER-1000 tesislerinin güvenlik kayıtları oldukça iyidir ve önemli güvenlik etkisi olan olaylar görülmemiştir (ROSATOM, 2015).



Resim 3.4. Çek Cumhuriyeti' nde ki Temelin Nükleer Santralindeki iki VVER-1000 / V-320 reaktör (ülke elektriğinin % 20'sini sağlamaktadır)

3.1.3. VVER-1000 – AES-91 & AES-92

VVER-1000/V-320, AES-91 (veya VVER-1000/V-428) Saint-Petersburg Atomenergoproekt' de ve AES-92 (veya VVER-1000/V-412 and 466) tasarımları ise Moscow Atomenergoproekt' de geliştirildi. Bu tasarımlar BDBA (tasarımın ötesinde temel kaza) kavramını uygulamaya koydu ve pasif ve aktif güvenlik sistemlerinin kombinasyonun dengesine dayalı bir uygulama ortaya çıkardı. Güç üretim sistemlerinde - reaktör, birincil soğutma devresi ve türbin çevrimlerinde temelde yalnızca küçük değişiklikler yapıldı. Ana değişiklikler güvenlik sistemleri ve tesis yerleşimindeydi. V-428 reaktörlü AES-91 enerji santrali, Tayvan'da inşa edilmiş, başlangıçta Finlandiya için önerilen, Fin mevzuatını yansıtan AES-91'den geliştirilmiş bir reaktördü. 2007 yılında hizmete giren Tayvan AES-91 birimleri, dünyada "çekirdek yakalayıcılı" olan ilk reaktörlerdir. Avrupa' da faaliyet gösteren kuruluşlara uygun teknik gereksinimleri ile (Avrupa Hizmet Gereksinimleri (EUR)) uygun olarak sertifikalandırılan bir AES-92 tasarımına sahip tesis, Bulgaristan Belene bölgesi için planlandı ancak yapımı askıya alındı.



Resim 3.5. Çin’de ki 1 ve 2' si AES-91 tipinde olan nükleer güç santrali

3.1.4. VVER-1200 – AES-2006

AES-2006 tasarımı, VVER santrallerinin son versiyonudur. Bu enerji santralleri, Gen III + nükleer tesislerin tüm uluslararası güvenlik gereksinimlerini karşılar. İlk AES-2006 birimleri şimdi Rusya 'da yapım aşamasındadır; Sosnovyi'de Bor tesisinde iki birim (Leningrad II), Novovoronezh'de iki birim (Novovoronezh II) ve Kaliningrad Bölgesinde iki birim (Baltık projesi). Ayrıca Türkiye'de dört, Belarus’ da iki birim AES-2006 için inşaat sözleşmeleri imzalandı ve saha hazırlığı yapılmıştır. Ayrıca Temelin 3-4 (Çek Cumhuriyeti) ve Hanhikivi 1 (Finlandiya) için ise öneri getirilmiştir.

Çizelge 3.2. VVER versiyonlarının gelişimi

GEN 1 VVER	*GEN II VVER-440*	*GEN II/III VVER-1000*	*GEN III+ VVER-1200*
V-210 RUSYA	V-179 RUSYA	V-187 RUSYA	V-392M RUSYA
V-365 RUSYA	V-230 RUSYA	V-302 UKRAYNA	V-491 RUSYA BELARUS
	V-213 RUSYA UKRAYNA ÇEK CUMHURİYETİ FİNLANDİYA SLOVAKYA	V-338 UKRAYNA RUSYA	
	V-270 ERMENİSTAN	V-320 RUSYA UKRAYNA ÇEK CUMHURİYETİ BULGARİSTAN	
		V-428 ÇİN HALK CUMHURİYETİ	
		V-412 HİNDİSTAN	
		V-466 İRAN	
1960	1970	1980 1990	2000 2010

3.1.5. Geleceğin VVER' ı - VVER-TOI

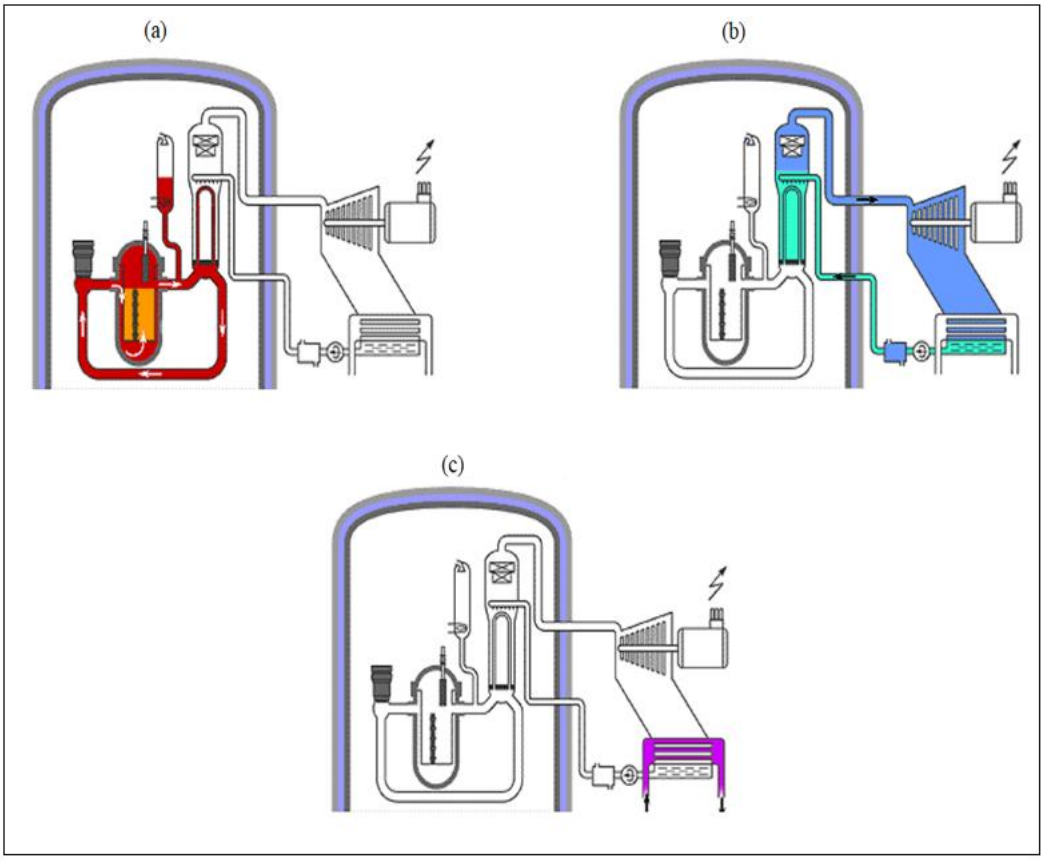
VVER-TOI projesinin amacı (tipik, optimize edilmiş, geliştirilmiş bilgi), standartlaştırılmış bir VVER santrali oluşturmak, teknoloji ve ekonomiyi geliştirmektir. VVER-TOI, Moskova Atomenergoproekt tarafından geliştirilmekte ve AES-2006 / V-392M tasarımına dayanmaktadır. V-510 olarak adlandırılan ve VVER-1200 tasarımının daha ileri bir evrimini temsil eden bir başka tasarımda hali hazırda geliştirilmektedir (ROSATOM, 2015).

3.2. VVER-1000 Tasarım Özellikleri

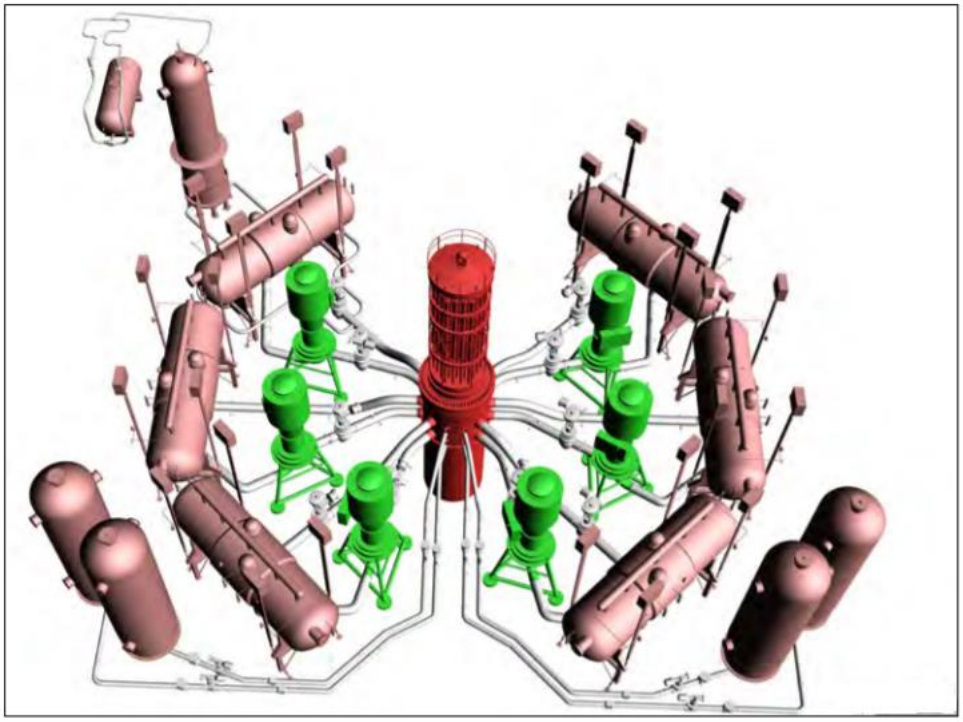
VVER-1000 reaktörlerininin bir çok tasarımı batı yapımı PWR reaktörlerine benzemektedir. Bir nükleer santraldaki sistemler konvansiyonel güç santralları ile aynı mantıkla çalışırlar. Isı enerjisinin üretildiği kısımda elde edilen buharın türbin-jeneratörü döndürerek elektrik üretilmesi felsefesi, temel olarak nükleer santrallarda da aynıdır (Şekil 3.1). Nükleer santrallar ısı üretmek için nükleer reaksiyonu kullandıkları ve bunun sonucunda çevreye salınmaması gereken radyoaktif maddeler ürettikleri için, bazı ek sistemler kullanırlar. Örneğin, bir çok nükleer santralda nükleer yakıtı barındıran yakıt tüpleri arasından ısınarak geçen su, doğrudan türbine gönderilmeyip, türbin için buhar üretilen ikinci bir çevrimi ısıtmak için kullanılır. Bununla ilgili sistemlere Birincil Sistem adı verilir.

İkincil sistem ise birincil soğutma sistemindeki ısıyı alarak türbin-jeneratörü döndürmek için gerekli olan buharın üretilmesi için kullanılan sistemdir. Her iki sistem de kapalı birer döngü oluşturmuşlardır (Şekil 3.2).

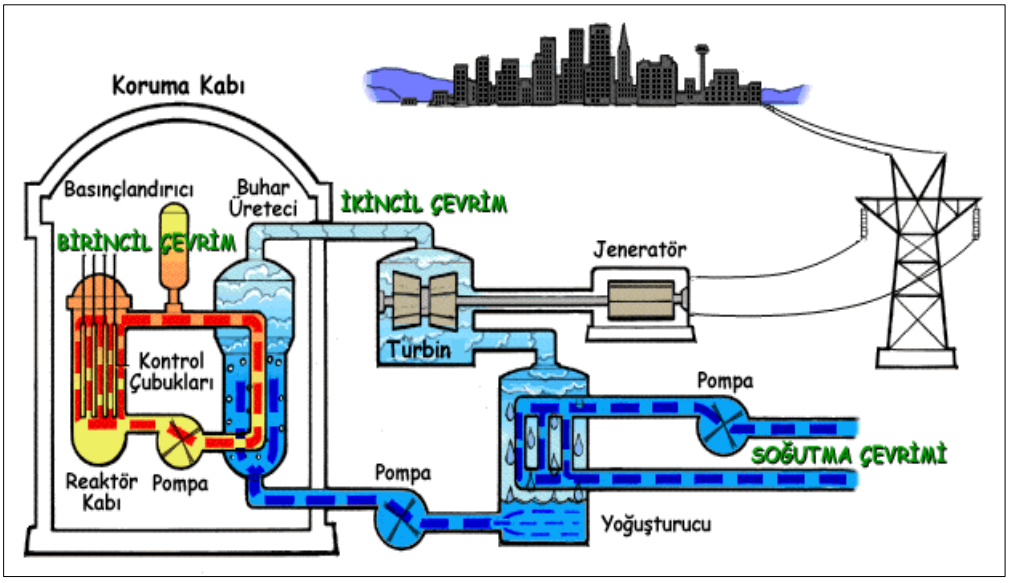
Soğutma sistemi ise ikincil sistem içinde yer alan yoğuşturucuyu soğutmak için kullanılır. Bu sistemde sıcaklığı yoğunlaştırıcıya göre daha az olan, deniz, göl veya ırmaklardaki su kullanılır. Suyun bolca bulunmadığı yörelerde ise bu sistemin içinde soğutma kulelerinden faydalanılır.



Şekil 3.2. VVER reaktörü çevrimleri a) birincil çevrim, b) ikincil çevrim, c) soğutma çevrimi (*Türkiye Atom Enerjisi Kurumu*, n.d.)

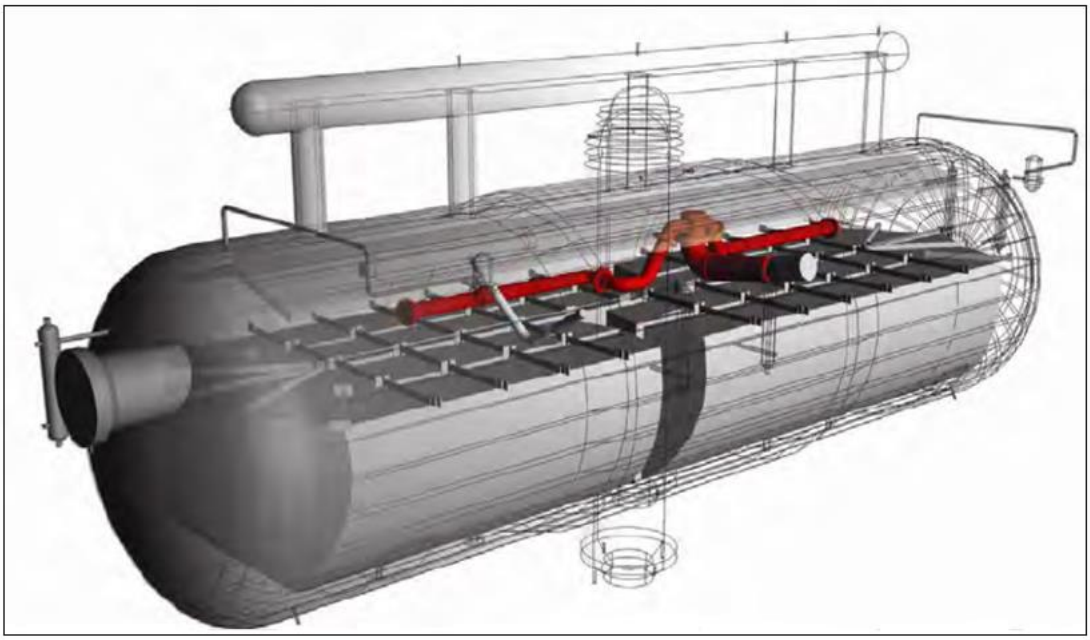


Şekil 3.3. Birincil sistemin şeması (Glück, 2007)



Şekil 3.4. Basitleştirilmiş bir VVER tasarımı

PWR ve VVER tasarımları arasında ki en önemli fark VVER' ların yatay buhar üreteçleridir (Şekil 3.5). VVER'lar da buhar üreteçlerini, büyük boyutlarda yatay kaynatma kabı olarak düşünmek mümkündür. VVER buhar üreteçlerinin ortalama olarak yarıçapları 2,3 m, boyları ise 12 metre kadardır (*Nükleer Enerji Dünyası*, n.d.).



Şekil 3.5. VVER yatay buhar üreteci (Glück, 2007)

3.2.1. VVER' lerde yakıt

VVER reaktörlerde yakıt demetleri, PWR'lerde olduğu gibi kare değil altıgen yapıdadır. Dolayısıyla VVER reaktör kalbi de altıgen yapıdadır. Yakıt demeti sayısı tasarım yapısına göre değişse de , VVER-1000 reaktörlerinde ortalama 163 yakıt demeti kullanılmakta bu da yaklaşık 66 ton uranyuma denk gelmektedir. Yakıt düşük zenginlikte uranyumdan oluşmakta ve reaktörün farklı bölgelerinde farklı zenginlikte yakıt kullanılmaktadır. Yakıt zarfı (clad) çoğunluğu zirkonyumdan olmak üzere, niobium ve hafniyumdan oluşmaktadır. VVER'larda kontrol çubukları ise bor karbürden (B_4C) imal edilmektedir. Her yakıt demetinde yaklaşık olarak 18 adet kontrol çubuğu bölmesi vardır. Çizelge 3.3' de VVER-1000 reaktörü için tasarım özellikleri gösterilmiştir.

Çizelge 3.3. VVER-1000 tasarım özellikleri

Reaktör termal gücü	3000 MWt
Reaktör basıncı	15,7 MPa
Yakıt	UO_2
Yakıt çubuğu sayısı	312
Yakıt demeti sayısı	163
Girişteki akış oranı (m^3/h)	84 800
Giriş entalpisi (kJ/kg)	1290
Kor girişinde soğutucu sıcaklığı (K)	575
Yakıt demeti şekli	Altıgen
Kordaki yakıt demeti sayısı	163
Demetler arasındaki mesafe	23,6
Bir yakıt demetindeki yakıt çubuğu sayısı	312
Pelet çapları arasındaki mesafe	1,5 mm
Pelet dış çapı	7,57mm
Zarf dış çapı	9,2 mm
Zarf malzemesi	AlaşımZr + 1% Nb

4. MATERYAL VE YÖNTEM

Nükleer reaktör analizleri yapılırken, iki temel analiz söz konusu olmaktadır. Bunlar nötronik ve termal analizlerdir. Nükleer reaktörü, nötronik açıdan inceleyerek, reaktörde ki yanma değerlerine, nötron çarpım faktörü değerlerine ve bağıl güç yoğunluğu dağılımı değerleri gibi nükleer reaktörün çalışması için önem arz eden değerler incelenebilir. Nötronik analizler yapılırken, bir çok kod kullanılabilir. DRAGON, CITATION, MCNP, MCU, APOLLO-2, TVS-M, WIMS8A, HELIOS gibi kodlar, nötronik kodlar arasında öne çıkanlardır.

Nükleer reaktörlerin termal analizleri yapılırken, yakıt, soğutucu ve zarf bölgelerindeki termal değerler (sıcaklık, yoğunluk, entalpi gibi) incelenir. Reaktörün çalışma kriterleri ve güvenlik faktörleri açısından, bu termal değerlerin bilinmesi oldukça önemlidir. Termal analizler yapılırken de tıpkı nötronik analizlerde olduğu gibi bir çok kod kullanılabilir. ARGUS, MANTA, COBRA, SCRIMP, TEMP, UTSG gibi kodlar termal hidrolik analiz yapılırken kullanılan kodlardan bazılarıdır.

Bu tez kapsamında reaktörün kritiklik değerlerini incelemek ve bağıl güç yoğunluk değerlerini elde etmek için MCNP nötronik kodu kullanılacaktır. Termal analizleri yapmak için ise COBRA-IV PC termal analiz kodu kullanılacaktır.

4.1. MCNP

Monte Carlo metodu, olasılık teorisine dayalı bir sistemdir. Monte Carlo metodunda esas olan, istatistiksel ve matematiksel tekniklerle bir deneyi veya çözülmesi gereken bir fiziksel olayı tesadüfi sayıları defalarca kullanarak simülasyonunu yapmaktır (Briesmeister, 1997). Fizik ve matematik problemlerinin çözümünde MCNP (Monte Carlo N – Parçacık Taşınım) kodu kullanılarak, nükleer transport hesaplamalarında olumlu sonuçlar alınmaktadır (Hadjian, 2019).

Nükleer sistem analizleri yapılırken, nötronik hesaplamalar büyük önem kazanmaktadır. MCNP genel amaçlı, sürekli enerji geçişini (transport) üç boyutlu genelleştirilmiş geometrilerde, zaman*a* bağımlı nötron foton ve elektronun hareket ve davranışlarını

modellemek için Monte Carlo metodu kullanarak çözen genel bir koddur. MCNP kodunda hem sabit kaynak hem de kritik altı problemler çözülebilir. MCNP, Monte Carlo simulasyonu ve bir takım modelleri içeren, nükleer özellikleri olan fizik ve matematik konularını içeren bir koddur. MCNP kodu karmaşık parçacık geçişini modellemede oldukça iyi uygulanır. Çünkü sürekli (continuous) tesir kesiti verisini kullanır. MCNP, Monte Carlo grubu tarafından Los Alamos laboratuarında teorik fizik için genelleştirilmiş 40000 satır FORTRAN ve yorumlar içeren 1000 satır C kaynak kodlayıcı ve programı uygulayan genel bir bloğa sahiptir. Bu kod 1940 yıllarında nükleer savunma ve silahları için geliştirilmiş bir koddur (Coşkun, 2010).

MCNP veri dosyası hazırlanırken;

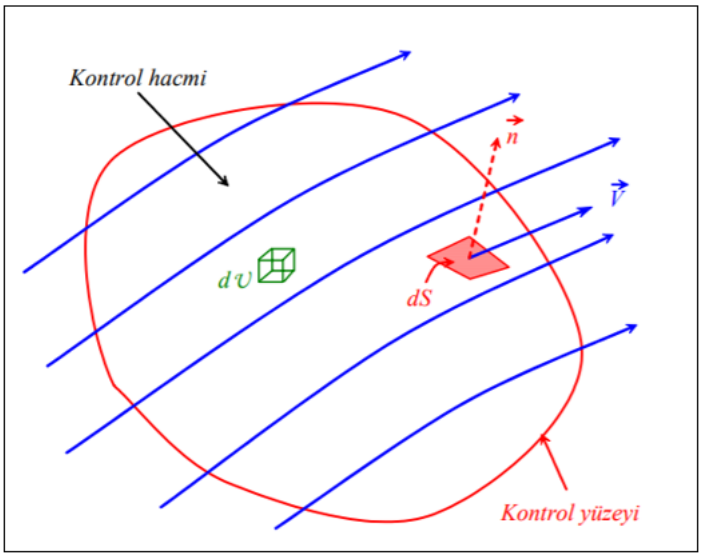
- Geometrik özellikler
- Malzemelerin tanımlanması ve tesir – kesiti hesaplarının seçilmesi
- Nötron, foton yada elektron kaynağının yeri ve temel özellikleri
- Programdan alınacak cevaplar (tally)
- Hesaplama zaman verimini artırmak için kullanılacak varyans azaltma tekniği (variance reduction) bilgileri veri olarak girilir.

MCNP kodundan çıktı olarak yanma ile ilgili birçok veri elde edilebilir ancak en önemli çıktılarından biri bağıl güç dağılımı (relative power distribution) değerleridir. F7 tally kartı, MCNP kodundaki ısıtma enerjisi hesaplamasıyla ilgilidir. Hücreye salınan enerjiyi fisyon, nötronlar ve hızlı gama ile elde eder. Bu veriler, normalleştirilmiş bir değer olarak birim kütle başına fisyon nötronu değerini sağlar. (MeV / g / fisyon). Böylece bu değerler, termal analiz yapan COBRA koduna veri olarak kullanılır.

4.2. COBRA IV

COBRA IV nükleer termal hidrolik kodu, reaktör korunda kanallar arasındaki ısı iletimini ve buna bağlı soğutucuda değişkenlik gösteren termo-fiziksel özelliklerin elde edilmesinde kullanılan bir koddur. Bu kod yardımıyla reaktör korundaki yakıt kanallarında bulunan soğutucularda, kanal boyunca gerçekleşen basınç düşmesi, kütlesel akı değişimi, entalpi değişimi, ve yakıt çubuklarında oluşan sıcaklık değerleri hesaplanabilmektedir. Reaktör korunda bulunan yakıt kanallarındaki akışkandaki değişkenlik gösteren termo-fiziksel

karakteristikler kütlenin korunumu, enerjinin korunumu ve momentumun korunumu yardımıyla sürekli rejimde veya zamana bağlı olarak hesaplamalar elde edilir. Ayrıca yakıt çubuklarında ki sıcaklık hesabı için 'implicit' yani örtük metodu kullanır (PC-IV, n.d.). Kısaca, COBRA IV nükleer termal hidrolik kodu reaktör korunu belirli hücrelere bölerek kanal analizi yapar. Her bir hücrede ki akış için kütle, momentum ve enerji korunumu genel denklemleri aşağıda verilmiştir.



Şekil 4.1. Sonlu kontrol hacmi

Şekil 4.1' da gösterilen V kontrol hacminin S yüzeyinden birim zamanda çıkan net kütle miktarı Eş. 4.1'de verilmiştir.

$$= \int\int_{S} \rho . \vec{V} . \vec{n} \; dS \tag{4.1}$$

V kontrol hacmindeki kütle miktarının birim zamandaki değişimi de Eş. 4.2'de gösterildiği gibidir.

$$= -\frac{\partial}{\partial t} \int\int\int_{v} \rho . \, dv \tag{4.2}$$

Dolayısıyla;

$$\iint_s \rho.\vec{V}.\vec{n}\ dS = -\frac{\partial}{\partial t}\iiint_v \rho.\ dv \tag{4.3}$$

Sonuç olarak süreklilik denkleminin integral formu Eş. 4.4' de gösterildiği gibi olur.

$$\iint_s \rho.\vec{V}.\vec{n}\ dS + \frac{\partial}{\partial t}\iiint_v \rho.\ dv = 0 \tag{4.4}$$

Bir diğer korunum denklemi olan momentum korunum denkleminde ise dış kuvvetlerin toplamı, atalet kuvvetine eşittir. Yani momentumun birim zamanda değişimine eşittir.

$$\sum \vec{F} = m.\vec{a} = m.\frac{d\vec{V}}{dt} \tag{4.5}$$

Sabit kütle için;

$$\sum \vec{F} = \frac{d}{dt}\left(m\vec{V}\right) \tag{4.6}$$

Dış kuvvetler,gravitasyonel kuvvetler, basınç kuvvetleri ve teğetsel kuvvetlerin toplamıdır.

Gravitasyonel kuvvetler Eş. 4.7' de gösterildiği gibidir.

$$\iiint_v \vec{f}.\rho.\ dv \tag{4.7}$$

Eş.4.7 ' de f birim kütleye etkiyen bünyesel kuvvettir.

Basınç kuvvetleri ise Eş. 4.8' de gösterilmiştir.

$$= -\iint \rho.\ \vec{\mathrm{n}}\ dS \tag{4.8}$$

Teğetsel kuvvetin değeri ise $= \vec{F}_{visc}$ ifadesi ile gösterilmektedir.

Momentumun birim zamandaki değişimi incelenirken, kontrol yüzeyinden çıkan ve kontrol yüzeyine giren kütlelerin taşıdıkları momentumlar arasındaki farka bakılır. Bu değer Eş. 4.9 da verilmiştir.

$$= \int\int_{s} (\rho . \vec{V} . \vec{n} \; dS) . \vec{V} \tag{4.9}$$

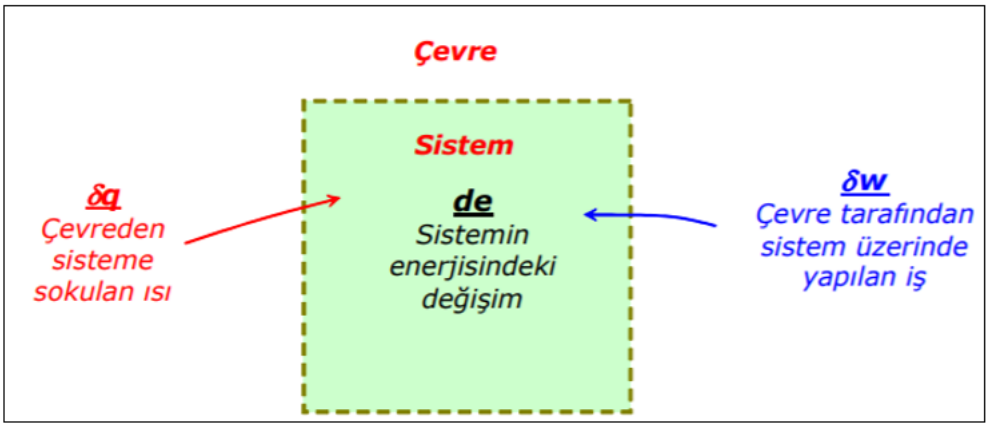
Kontrol yüzeyinde ki kütle miktarının değişiminden kaynaklanan momentum değişimi ise Eş. 4.10' da gösterilmiştir.

$$= \frac{\partial}{\partial t} \int\int\int_{v} (\rho . \, dv) . \vec{V} \tag{4.10}$$

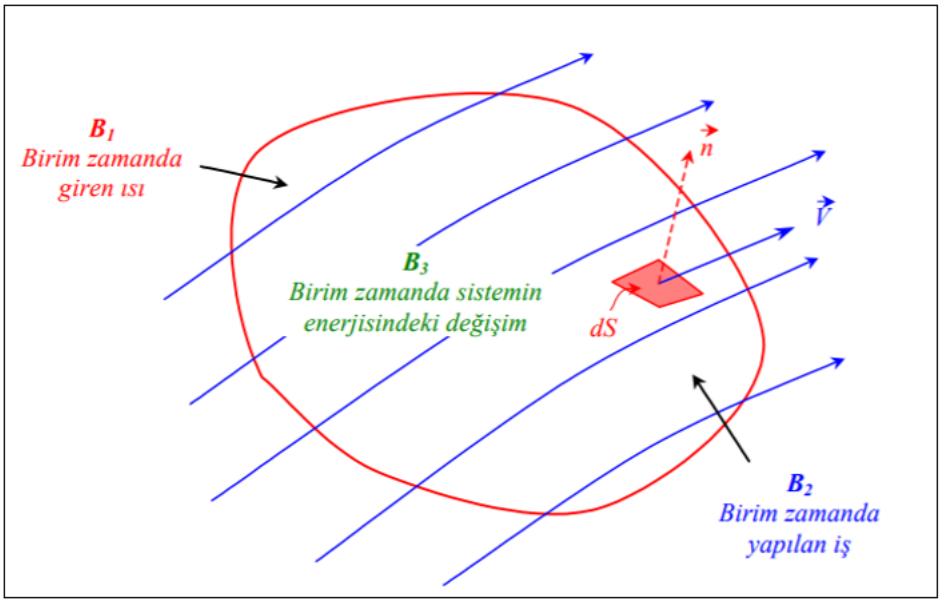
Sonuç olarak momentum denkleminin integral formu Eş. 4.11' de ki şekliyle gösterilir.

$$\frac{\partial}{\partial t} \int\int\int_{v} (\rho . \, dv) . \vec{V} + \int\int_{s} (\rho . \vec{V} . \vec{n} \; dS) . \vec{V} = -\int\int \rho . \; \vec{n} \; dS + \vec{F}_{visc} + \int\int\int_{v} \rho . \; \vec{f} \; . \, dv \tag{4.11}$$

Enerjinin korunumu prensibi, bir sistemin iç enerjisindeki değişim miktarı, o sisteme ilave edilen ısı miktarı ile sistemin çevresine uyguladığı iş arasındaki farka eşittir, şeklinde açıklanabilir.



Şekil 4.2. Sistem üzerinde yapılan iş



Şekil 4.3. Birim zamanda sistem üzerinde yapılan iş değişimi

$B_1 + B_2 = B_3$ (4.12)

Sisteme birim zamanda sokulan ısı (radyasyon veya yanma yoluyla) miktarı Eş. 4.13' de gösterilmiştir.

$$= \int_v \int \int \dot{q} . \rho . \, dv \tag{4.13}$$

$\dot{q}$ birim kütle başına sokulan ısıyı göstermektedir.

Viskoz kaynaklı (ısı iletimi, kütle difüzyonu) olarak sokulan ısı ise $= \dot{Q}_{visc}$ şeklinde ifade edilir.

Böylece; sisteme birim zamanda sokulan ısının değeri Eş. 4.14 halini alır.

$$B_1 = \int_v \int \int \dot{q} . \rho . \, dv + \dot{Q}_{visc} \tag{4.14}$$

Çevrenin sistem üzerinde birim zamanda yaptığı iş, basınç, bünyesel ve vizkoz kuvvetlerinin

yaptığı iş toplamına eşittir.

Basınç kuvvetlerinin yaptığı iş Eş. 4.15' de gösterildiği gibidir.

$$= -\int\int_{s} (\rho . \vec{n}\ dS).\vec{V} \tag{4.15}$$

Bünyesel kuvvetlerin yaptığı iş ise Eş. 4.16' da verilmiştir.

$$= \int\int\int_{v} (\rho .\ \vec{\mathrm{f}} .\ dv)\vec{V} \tag{4.16}$$

Viskoz kuvvetlerin yaptığı iş de $= \dot{W}_{visc}$ şeklinde gösterilmiştir.

Böylece çevrenin sistem üzerinde birim zamanda yaptığı iş Eş. 4.17' de ki halini alır.

$$B_2 = -\int\int_{s} (\rho . \vec{n}\ dS).\vec{V} + \int\int\int_{v} (\rho .\ \vec{\mathrm{f}} .\ dv)\vec{V} + \dot{W}_{visc} \tag{4.17}$$

Birim kütle başına enerji Eş. 4.18' de verilmiştir.

$$= e + \frac{1}{2}V^2 \tag{4.18}$$

(e, iç enerji ve $1/2V^2$ kinetik enerji)

Kontrol yüzeyinden çıkan ve kontrol yüzeyine giren kütlelerin taşıdıkları enerjiler arasındaki farkın değeri Eş. 4.19' da gösterilmiştir.

$$= \int\int_{s} (\rho . \vec{V} . \vec{n}\ dS).\left(e + \frac{1}{2}V^2 \right) \tag{4.19}$$

Kontrol hacmindeki kütle miktarının değişiminden kaynaklanan enerji değişimi ise Eş. 4.

20’ de verilmiştir.

$$= \frac{\partial}{\partial t} \iiint_v (\rho . \, dv) . \left(e + \frac{1}{2} V^2 \right) \tag{4.20}$$

Sonuç olarak enerji denkleminin integral formu Eş. 4.21’ de ki son halini alır. (M.Adil Yükselen, 2006)

$$\frac{\partial}{\partial t} \iiint_v \rho . \left(e + \frac{1}{2} V^2 \right) dv + \iint_s (\rho . \vec{V} . \vec{n} \; dS) . \left(e + \frac{1}{2} V^2 \right) = - \iint_s (\rho . \vec{n} \; dS) . \vec{V} + \iiint_v (\rho . \; \vec{f} \; . \, dv) \vec{V} + \dot{W}_{visc} + \iiint_v (\rho . \; \dot{q} . \, dv) + \dot{Q}_{visc} \tag{4.21}$$

4.3. Nano Akışkanlar

Ultra yüksek performanslı soğutma, birçok sektörün önemli ihtiyaçlarından biridir. Bununla birlikte, düşük ısıl iletkenlik, soğutma amaçları için gerekli olan enerji verimli ısı transfer sıvılarının geliştirilmesinde birincil sınırlamadır. Nanosıvılar, su, yağ, dizel, etilen glikol vb. gibi ısı transfer sıvılarında ortalama boyutları 100 nm'nin altında olan nanoparçacıkların eklenmesiyle tasarlanmıştır. Deneyler, nano sıvıların baz sıvılara kıyasla önemli ölçüde daha yüksek termal iletkenliklere sahip olduğunu göstermiştir (Li et al., 2009). Bu nanoparçacıklar, baz sıvının taşınmasını ve termal özelliklerini değiştirebilir. Literatürden görülebileceği gibi, başta alümina-su, CuO-su, TiO_2-su olmak üzere Ag (gümüş), Cu (bakır), Si (silisyum), Ti(titanyum), Zr (zirkonyum) gibi nano parçacıklar için de yapılan deneysel ve teorik çalışmalar mevcuttur (Mahbubul et al., 2012). Teorik olarak ısıl iletkenliği yüksek olan nanoparçacıklar; parçacık olanlar; Cu, Al, Fe, Au, ve Ag, parçacık olmayanlar; Al_2O_3, CuO, Fe_3O_4, TiO_2 ve SiC ve karbon nanotüpler sıklıkla su, yağ, aseton ve etilen glikol gibi temel akışkanlarla karıştırılmaktadır (Li et al., 2009). Soğutma sistemlerinde de nanoparçacıkların termal performansını inceleyen çalışmalar mevcuttur (Gürbüz et al., 2020).

Bu tez çalışması kapsamında, nükleer reaktörün soğutucu akışkanı değiştirilerek, reaktörün termal özellik değişimlerinin incelenmesi amaçlanmıştır. Soğutucu akışkan değişimi, reakörün soğutucu sıvısına (su) değişik türlerde ve oranlarda nano parçacık eklenerek sağlanmıştır. Nano parçacıkler seçilirken ısı iletim özellikleri başta olmak üzere, doğada bulunması, ekonomik özellikleri gibi parametreler dikkate alınmıştır.

Daha yüksek ısı iletimine sahip katı malzemelerin nano boyutta parçacıklar halinde, iş yapan akışkan içerisine ilave edilmesi ile akışkanların ısıl iletkenliği artırılmıştır. Yapılan çalışmalar nano akışkanların geleneksel karışımlara nazaran tortulaşma, akışı engelleme, aşınma ve basınç düşümü gibi problemlerde çok daha iyi olduklarını göstermiştir. Nanoakışkanın temel amacı mümkün olan en az konsantrasyonda nanoparçacıklar içerecek şekilde en yüksek ısıl iletkenlik kapasitesine ulaşmaktır. Deneysel yöntemlerle nano akışkan elde edilmek istenirse; direkt buharlaştırmalı teknikte kararlı nano akışkanlar,temel akışkan içerisinde nano parçacıklar buharlaşarak ve yoğunlaşarak elde edilir. Araştırmacılar daha yüksek ısıl iletkenliğe sahip nanoparçacıkların kullanılması nanoakışkanın ısıl performansını daha çok artacağını göstermişlerdir.

Tez çalışması kapsamında ele alınan nano parçacıklar ve özellikleri Çizelge 4.1' de verilmiştir.

Çizelge 4.1. Su ve nano parçacıkların termofiziksel özellikleri (Ghazanfari et al., 2016a)

	C (J/kg K)	ρ (kg/m^3)	k (W/mK)
Su	4179	997,1	0,605
Al_2O_3	765	3970	40
CuO	535,6	6500	20
TiO_2	686,2	4250	8,9538

Al_2O_3 (alüminyum oksit): Alümina, mühendislik çalışmalarında, en uygun maliyetli ve yaygın olarak kullanılan malzemelerden biridir. Yüksek termal iletkenliği, mükemmel boyut ve şekil alma kabiliyeti vardır. Yaygın olarak alümina olarak adlandırılan alüminyum oksit, arzu edilen malzeme özelliklerine yol açan güçlü iyonik atomlar arası bağa sahiptir. Alümina metalik olmayan bir katıdır. Bir çok çalışmada, nanoparçacık olarak kullanılmaktadır. Erime sıcaklığı 2040 °C'dir (Auerkari, 1996).

CuO (bakır oksit): CuO formülüne sahip inorganik bileşiktir. Siyah bir katı, bakırın iki kararlı oksitinden biridir, diğeri Cu_2O veya bakır oksittir. Mineral olarak tenorit olarak bilinir. Bakır madenciliğinin bir ürünüdür ve diğer birçok bakır içeren ürün ve kimyasal bileşiğin öncüsüdür (Allaker, 2012).

TiO_2 (titanyum dioksit): Titanyum oksit veya titanya olarak da bilinen titanyum dioksit, titanyumun doğal olarak oluşan oksitidir. Titanyum oksit (TiO_2), yüksek yüzey alanına sahip nanokristaller şeklinde mevcuttur. Manyetik özellikler gösterir. Erime noktası 1843° C ve kaynama noktası 2972° C dir.

Yoğunluk, akışkanların Re (Reynolds sayısı) ve Nu (Nusselt sayısı) sayıları ile sürtünme faktörleri ve buna bağlı olarak basınç kayıplarını ilgilendiren bir özelliktir. Nanoakışkanların yoğunluklarının belirlenmesinde kullanılan eşitlik ilk kez Pak ve Cho (Pak & Cho, 1998) tarafından önerilmiştir. Araştırmacıların önerdiği eşitlik, nanoakışkanın yoğunluğunu akışkan içerisindeki katı parçacık ve temel akışkan konsantrasyonlarına bağlı olarak belirlenmesi prensibine dayanır. Bu durum çeşitli deneysel çalışmalarda ve yapılan ölçümlerde kullanılmıştır (Vajjha et al., 2009). Nanoakışkanların yoğunluğu üzerine literatürde daha fazla araştırma yapılmasına ihtiyaç vardır. Pak ve Cho 'in önerdiği karışım teorisinin hangi durumlar için en uyumlu sonuçları verdiği daha detaylı olarak araştırılmalı ve diğer fiziksel özelliklerin yoğunluğa olan etkisi de bu teoriye dahil edilmelidir (Vajjha et al., 2009).

Nano akışkanlı soğutucu analizi yapılırken, soğutucunun yoğunluk, viskozite, özgül ısı ve termal iletkenlik değerleri değişmektedir. Yoğunluk hesabı yapılırken Eş. 4.1' de belirtilen denklem kullanılır [19].

$$\rho_{nf} = (1-\phi)\rho_f + \phi\rho_p \tag{4.1}$$

Isıl iletkenlik akışkanların önemli termofiziksel özelliklerindendir ve referans alınan akışkana göre, ısıl iletkenliğin arttırılması nanoakışkanların hazırlanmasında en temel prensiptir. Nanoakışkanların yüksek ısıl iletkenliğe sahip olmasına neden olan en temel mekanizmanın, parçacıklerin "Brownian Hareketi" olduğu düşünülmektedir (Jang, S.P. and Choi, 2004). Brownian hareketi, bir sıvıda yüzen veya asılı duran mikroskobik parçacıkların etraflarını çevreleyen ortamın moleküllerinden kaynaklanan rastgele hareketidir. Bu konuyu 1827 yılında ilk kez çalışan İskoçyalı botanikçi Robert Brown'ın ismiyle anılmaktadır. Bu mekanizma temel akışkan içerisindeki nanoparçacıklar düşünüldüğünde oldukça benzerdir.

$$K_{nf}/K_p = 4.97\phi^2 + 2.72\phi + 1 \quad (4.2)$$

Akışkanların özgül ısıları belki de araştırmacılar tarafından en az ilgi gören konulardan biri olmuştur. Ancak bu özellik nanoakışkanların soğutma uygulamalarındaki performansları konusunda çok önemli bilgiler verir. Nanoakışkanların özgül ısıları, diğer termofiziksel özelliklerine benzer olarak nanoparçacıkların boyut ve şekil özellikleri ile parçacık malzemesinden ve nanoakışkanın konsantrasyonu ve sıcaklığından etkilenir.

Özgül ısı üzerine sıcaklığın etkisi ise literatürde yine oldukça tartışmalı bir durum olarak kalmış ve tek bir cümle ile açıklanamayacak kadar karmaşık bir yapıya sahiptir. Ancak araştırmacılar özetle şu yargıya varabilmişlerdir; eğer nanoparçacıkların özgül ısısı temel akışkandan daha düşükse, o zaman sıcaklık artışı nanoakışkanın özgül ısısını düşürecektir. Tersi durumda ise özgül ısıda artış beklenmelidir.

$$Cp_{nf} = (1-\phi)Cp_f + \phi Cp_p \quad (4.3)$$

φ ifadesi, nanoparçacığın hacimsel oranını göstermektedir.

4.4. Bir Yakıt Olarak Toryum

Nükleer teknoloji temelde, bölünebilir (fissile) ^{235}U ve ^{239}Pu izotoplarının yakıt olarak kullanımına dayanmaktadır. Doğal toryum izotopu ^{232}Th, bir termal nötron yakalama (Thermal neutron capture) reaksiyonunun ardından, bölünebilir (fissile) ^{233}U izotopuna dönüşmektedir. Yakın zamana kadar, doğada toryumun varlığı ve nükleer teknolojideki potansiyel kullanımı maalesef yeterli bir öneme sahip değildi. Bunun en önemli nedeni toryum kaynaklarının jeolojik konumu idi. Genellikle gelişmiş ülkeler Uranyum rezervine sahip olsa da , Brezilya, Mısır ve Türkiye gibi gelişmekte olan ülkelerde de toryum rezervi toplam küresel rezervin yaklaşık %70'ini oluşturmaktadır. Şimdiye kadar yapılan çalışmalar, aslında toryumun dünya üzerinde mevcut olan birçok reaktör korunda yakıt olarak kullanılabileceğini ortaya koymuştur (Ünak, 2000).

1940'ların sonundan bugüne kadar, nükleer teknoloji liderleri ABD, Almanya, Kanada, Fransa, Japonya, Birleşik Krallık ve Hindistan, Çin ve Rusya gibi diğer ülkeler, toryum

tabanlı nükleer yakıt araştırma programları yürütmüşlerdir. Birçok özel araştırma kuruluşu (Battelle Memorial Institute, Westinghouse Electric Company…) toryum yakıt çevrimini incelemiştir (Ünak, 2000). Toryum yakıt döngüsünün geçmişi, bugünü ve geleceği üzerine inceleme yapan araştırmacılar, toryum yakıt döngüsündeki gelişmeleri değerlendirmek için , olasılıklara ve dezavantajlara bakarak, ticari reaktörler için toryum bazlı nükleer yakıt ve uranyum bazlı nükleer yakıtların avantaj ve dezavantajlarını incelemişlerdir (Frybort, 2014).

Toryum ve uranyum elementleri genel olarak doğada yaygın olarak dağılmıştır. Bu elementlerin kesin küresel rezervleri bilinmemesine rağmen stratejik önemi nedeniyle bilinen yatakları, toryumun küresel bolluğunun, uranyumdan yaklaşık üç kat daha yüksek olduğunu göstermektedir. Bu da, ^{232}Th 'nin izotopik doğal bolluğunun ^{235}U 'den yaklaşık 416 kat yüksek olduğunu göstermektedir (Ünak, 2000).

^{235}U 'in bölünebilir(fissile) karakteri var iken, ^{232}Th üretken (fertile) bir karaktere sahiptir ve dolayısıyla başka bir bölünebilirliğin yetiştiricisidir. (^{239}Pu ‘un ^{238}U’den üremesi gibi). ^{232}Th termal nötron yakalama reaksiyonunun ardından, bölünebilir bir ^{233}U çekirdeğine dönüştürülebilir.

$$^{232}\mathrm{Th(fertile)} \xrightarrow{(n,\gamma)} {}^{233}\mathrm{Th} \xrightarrow{\beta^-} {}^{233}\mathrm{Pa} \xrightarrow{\beta^-} {}^{233}\mathrm{U(fissile)} \tag{4.4a}$$

$$^{232}\mathrm{Th(fertile)} \xrightarrow{(n,2n)} {}^{231}\mathrm{Th} \xrightarrow{\beta^-} {}^{231}\mathrm{Pa} \xrightarrow{(n,\gamma)} {}^{232}\mathrm{Pa} \xrightarrow{\beta^-} {}^{232}\mathrm{U} \xrightarrow{(n,\gamma)} {}^{233}\mathrm{U(fissile)} \tag{4.4b}$$

^{232}Th nin termal nötron yakalama tesir kesiti (capture cross section), ^{238}U den daha fazladır. Ama ^{238}U in rezonans yakalama tesir kesiti ^{232}Th den üç kat daha büyüktür. Bu yüksek rezonans yakalama tesir kesiti, ^{238}U'yu hızlı reaktör üretken (fertile) malzemesi için iyi yapan bir enerji faktörüdür. ^{232}Th de termal reaktörler için üreken (fertile) malzeme olarak oldukça kullanışlıdır.

Toryum tabanlı yakıt kullanmanın bazı avantaj ve dezavantajları vardır. Avantajlarını sıralamak gerekirse;

- ^{233}U, fisyon özellikleri ^{235}U ve ^{239}Pu gibi oldukça iyi olan bir izotoptur. Dolayısıyla nükleer yakıt olarak kullanılmasında hiçbir engel yoktur.

- Toryum yakıt döngüsünden kaynaklanan uzun ömürlü aktinitler, uranyum veya plütonyum yakıt çevrimlerine göre çok daha düşük miktardadır. Bu günümüz dünyasında çevresel koruma için önemli bir avantajdır.
- Toryum ve bileşiklerinin fiziksel özellikleri, nükleer yakıt olarak kullanılan diğer bölünebilir (fissile) materyallere göre daha iyidir.
- Bilindiği gibi küresel uranyum rezervleri sınırlıdır. Toryum tabanlı nükleer yakıt kullanılması durumunda, doğal uranyum gereksinimlerinin yaklaşık %20 oranında azaltılacağı öngörülmektedir.
- Toryum tabanlı yakıt kullanımında, yakıt döngüsü maliyetlerinin, özellikle izotopun zenginleştirme süreçleri ortadan kalkacağı için yaklaşık % 20 oranında azalacağı öngörülmektedir.

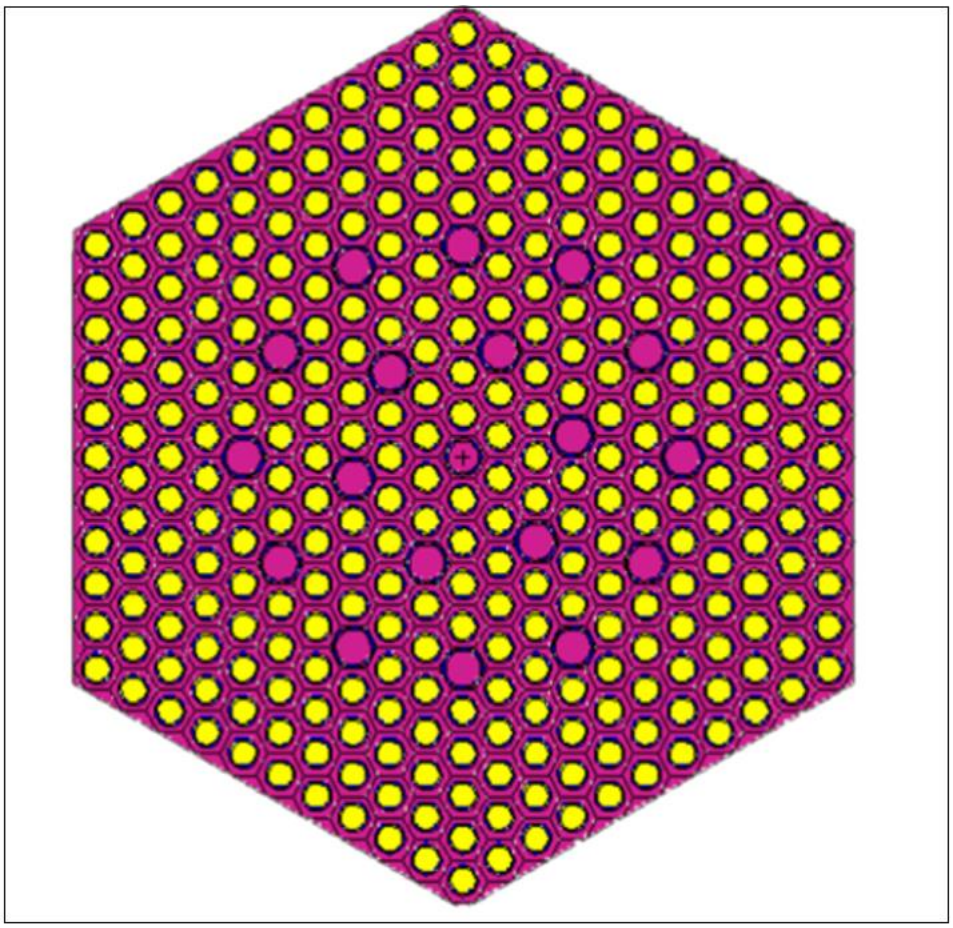
Bunların dışında toryum tabanlı yakıt kullanımının bazı olumsuz yönleri de vardır. Bu dezavantajları sıralamak gerekirse;

- En önemli problem, bölünebilir ^{233}U 'ü üretmek için ^{235}U veya ^{239}Pu ihtiyacından kaynaklanmıştır. Bu, toryumun tek başına klasik reaktör tasarımlarında kullanılmasının bir önemi olmadığı anlamına gelir.
- Toryum, yer kabuğunun %0,0007'lik kısmını oluşturmaktadır. Toryum, uranyum gibi doğada serbest halde bulunmayıp 60 civarında mineralin yapısı içinde yer almaktadır. Bunlardan sadece monazit ((Ce, La, Nd, Th, Y)PO4) ve torit ((Th, U) SiO4) toryum üretiminde kullanılmaktadır. Bu minerallerinde doğadan çıkarılma süreci oldukça maliyetlidir.
- Kullanılmış toryum yakıtlarının tekrar işlenmesi daha zordur.
- ^{233}U 'ün kullanılmış yakıttan ayrılması yeniden işlenmeyi gerektirirken, klasik uranyum bazlı yakıtların atıklarının yeniden işleme gerekmeden kullanılması daha kolaydır.

5. NÜMERİK SONUÇLAR

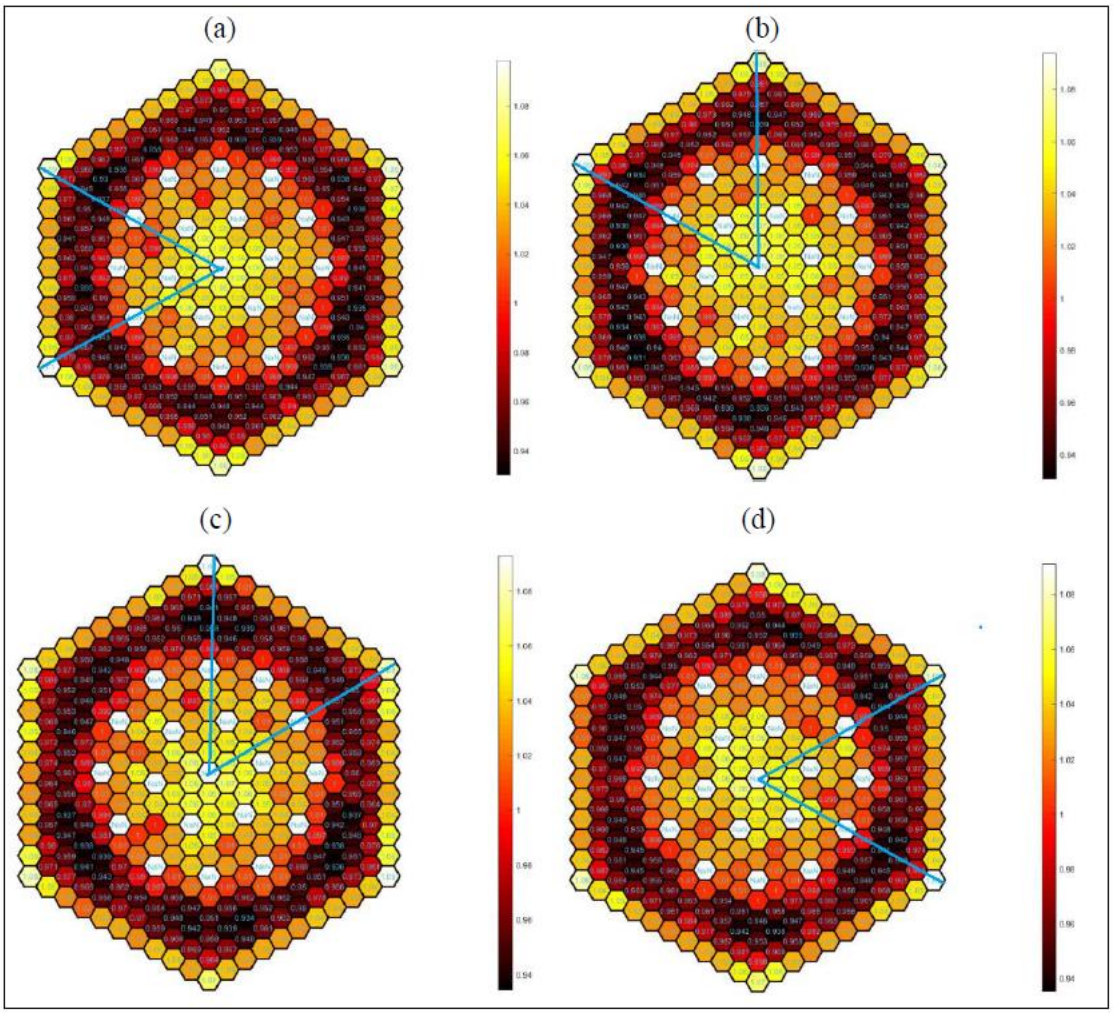
5.1. MCNP Analiz Sonuçları

Reaktör geometrik özellikleri ve soğutucu ile yakıt özelliklerine göre hazırlanan MCNP girdi dosyasının çalıştırılmasıyla, reaktörün kor modeli elde edilmiştir. Nötronik hesaplamalar yakıt demeti düzeninden bağımsız olarak yakıt sıcaklığı 1027 K ve soğutucu sıcaklığı da dâhil olmak üzere yakıt olmayan tüm bileşenlerin sıcaklığı 575 K olarak kabul edilerek, MCNP girdi dosyaları oluşturulmuş ve endf66 nükleer veri kütüphanesi kullanılarak kor modellemesi ve kritiklik değerleri elde edilmiştir. MCNP kor modeli Şekil 5.1'de gösterilmiştir.



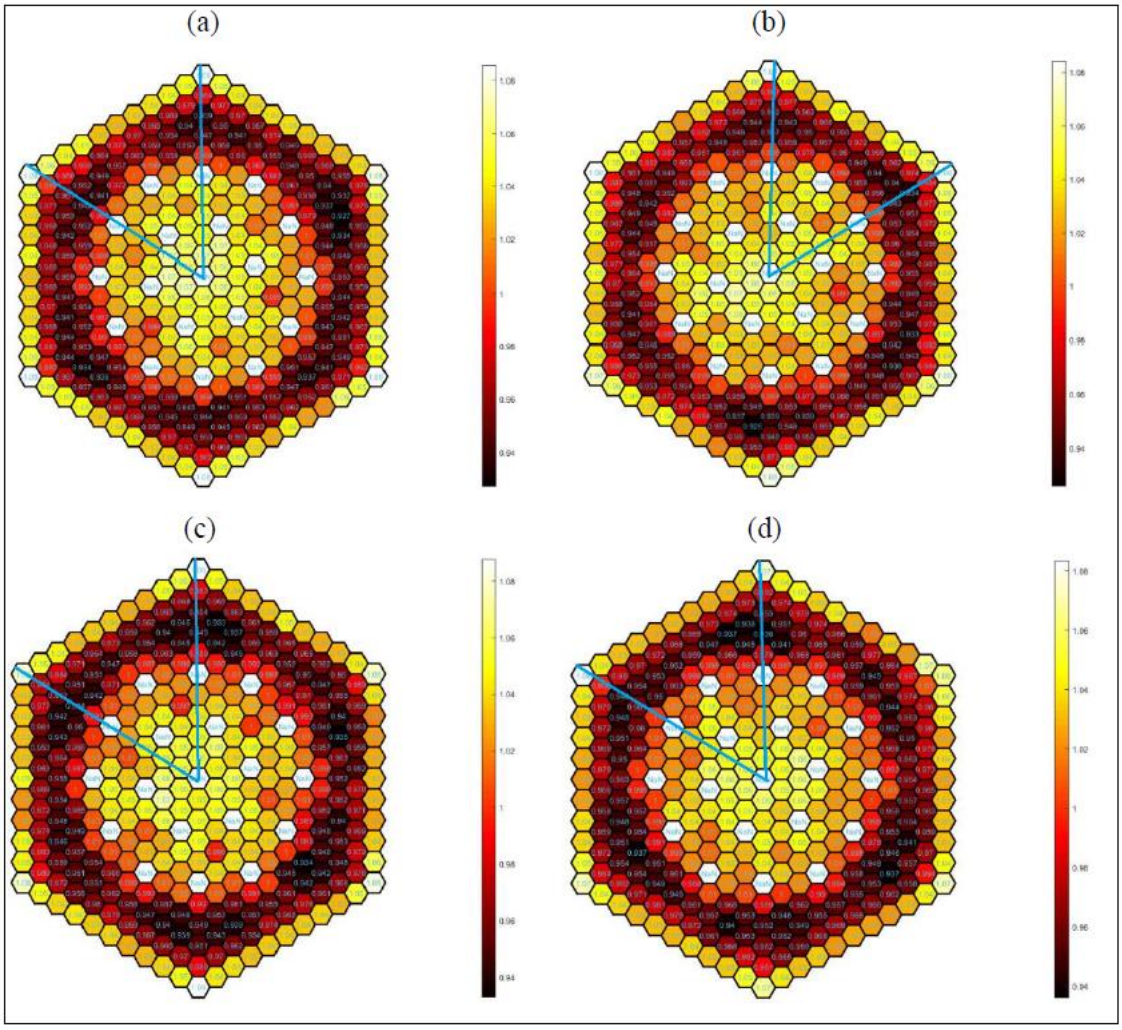
Şekil 5.1. MCNP kor modeli

Elde edilen bağıl güç dağılımına göre kor modelinin değişimi, UO_2 yakıt ve ThO_2 tabanlı yakıt ve Al_2O_3, CuO ve TiO_2 nano akışkanlarının değişen hacim oranlarına göre gösterilmiştir.



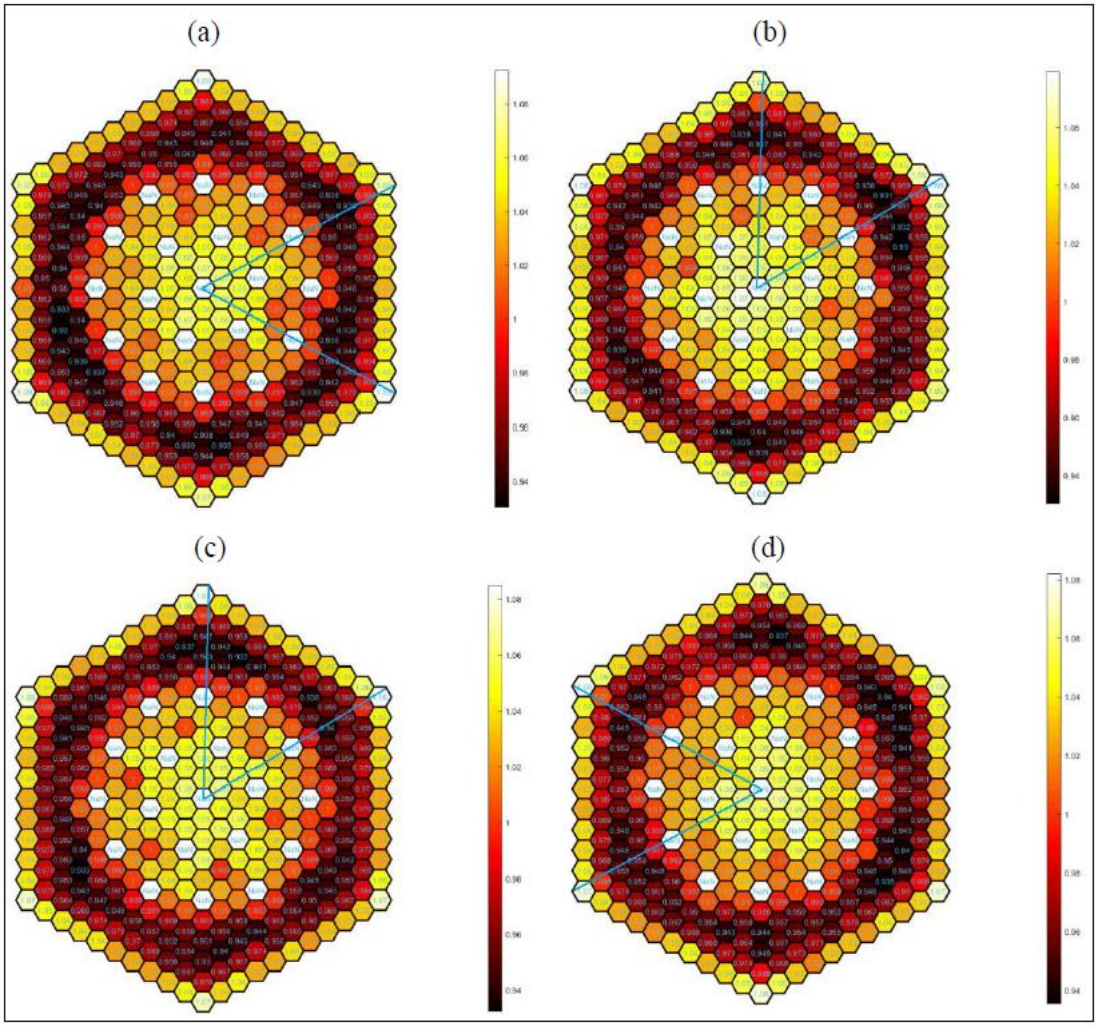
Şekil 5.2. UO_2 yakıt ve a) % 0,01, b) % 0,05, c) % 0,1, d) % 0,2 oranlı Al_2O_3 nanoparçacıklı soğutucu eklenmiş reaktörün MCNP kor modeli

Şekil 5.2' de UO_2 yakıt ve % 0,01, % 0,05, % 0,1, % 0,2 oranlı Al_2O_3 nanoparçacıklı soğutucu eklenmiş reaktörün MCNP kor modeli ve bağıl güç yoğunluk değerleri gösterilmiştir. Gösterilen görsellere göre en yüksek bağıl güç yoğunluğu değeri % 0,01 nanoparçacık oranlı akışkanda 1,08653 olarak elde edilmiştir.



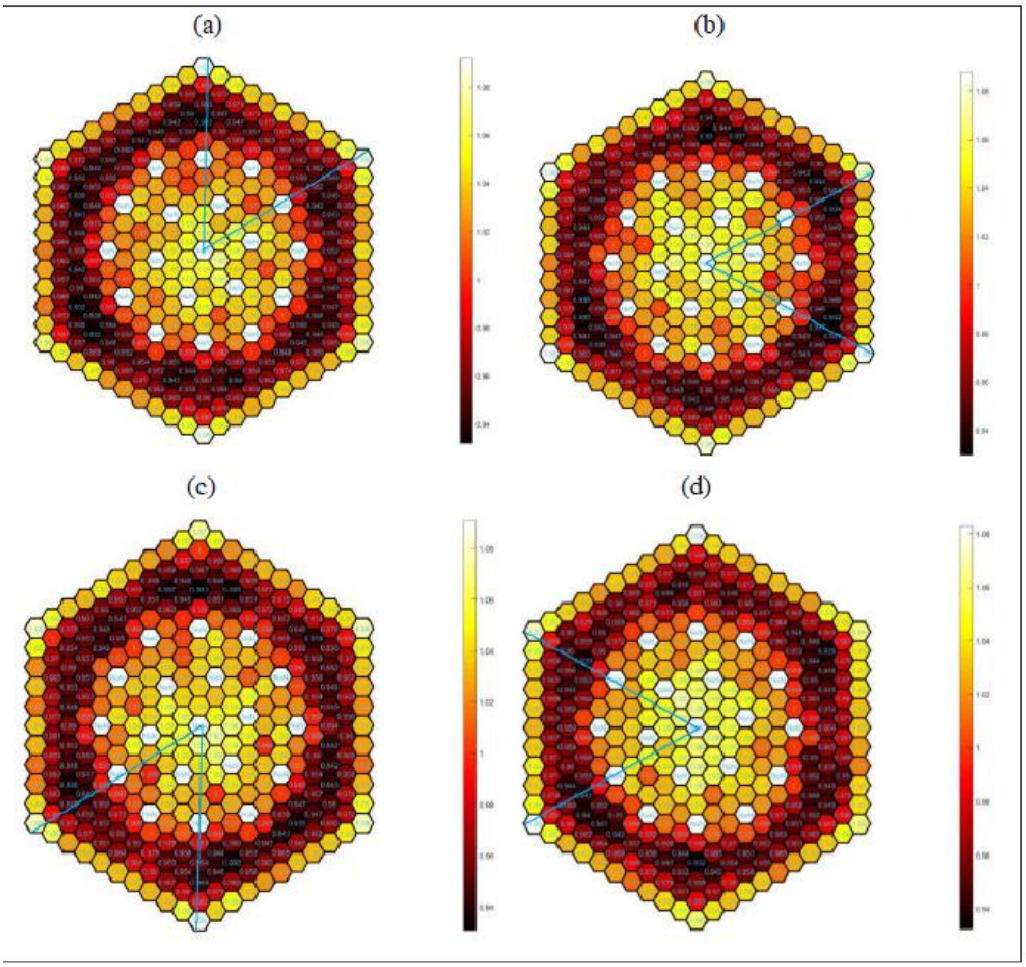
Şekil 5.3. %5 ThO_2 yakıt ve (a) % 0,01, (b) % 0,05, (c) % 0,1, (d) % 0,2 oranlı Al_2O_3 nanoparçacıklı soğutucu eklenmiş reaktörün MCNP kor modeli

Şekil 5.3' de %5 ThO_2 yakıt ve % 0,01, % 0,05, % 0,1, % 0,2 oranlı Al_2O_3 nanoparçacıklı soğutucu eklenmiş reaktörün MCNP kor modeli ve bağıl güç yoğunluk değerleri gösterilmiştir. Gösterilen görsellere göre en yüksek bağıl güç yoğunluğu değeri % 0,1 nanoparçacık oranlı akışkanda 1,08778 olarak elde edilmiştir.



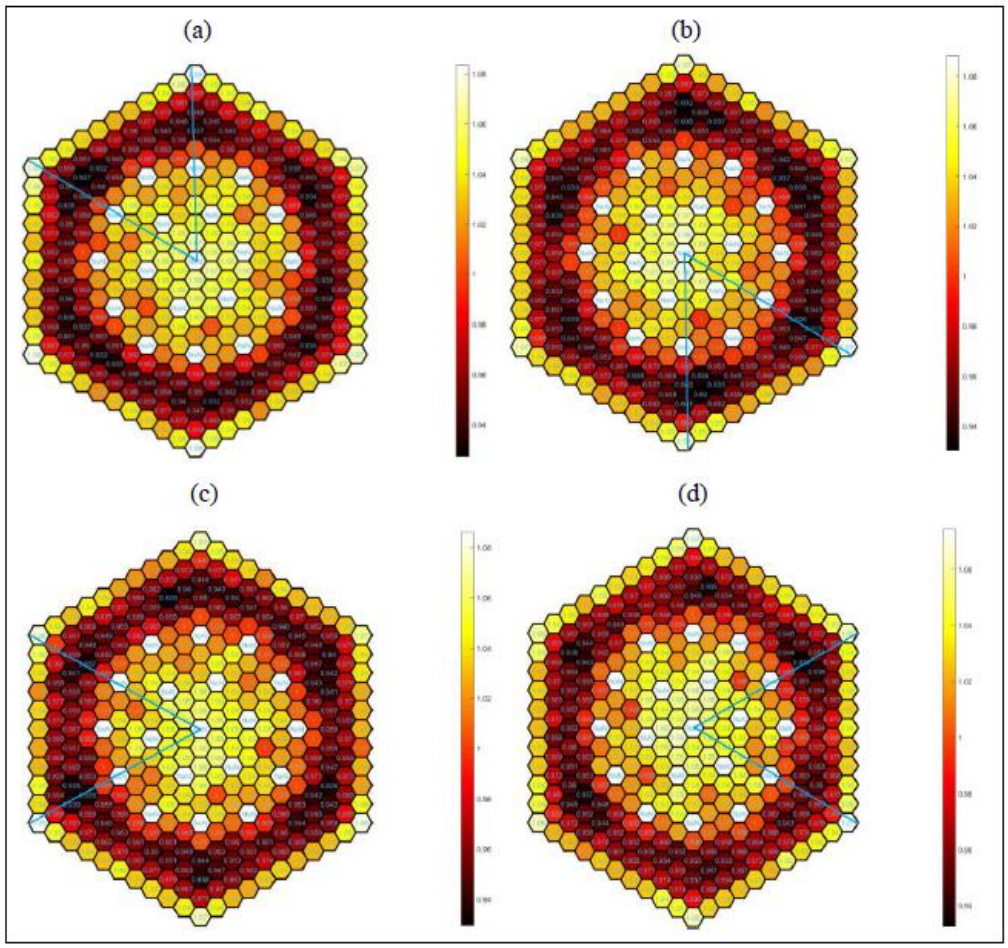
Şekil 5.4. %10 ThO_2 yakıt ve (a) % 0,01, (b) % 0,05, (c) % 0,1, (d) % 0,2 oranlı Al_2O_3 nanoparçacıklı soğutucu eklenmiş reaktörün MCNP kor modeli

Şekil 5.4' de %10 ThO_2 yakıt ve % 0,01, % 0,05, % 0,1, % 0,2 oranlı Al_2O_3 nanoparçacıklı soğutucu eklenmiş reaktörün MCNP kor modeli ve bağıl güç yoğunluk değerleri gösterilmiştir. Gösterilen görsellere göre en yüksek bağıl güç yoğunluğu değeri % 0,01 nanoparçacık oranlı akışkanda 1,09258 olarak elde edilmiştir.



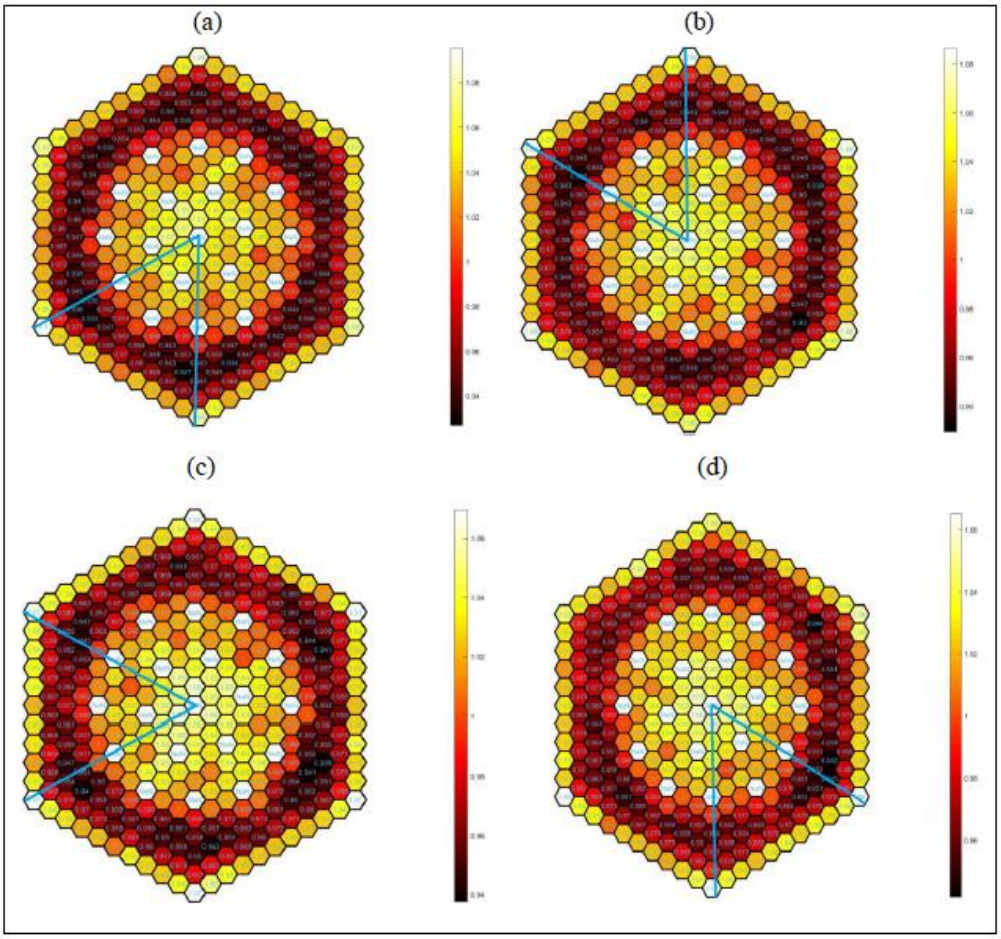
Şekil 5.5. %15 ThO_2 yakıt ve (a) % 0,01, (b) % 0,05, (c) % 0,1, (d) % 0,2 oranlı Al_2O_3 nanoparçacıklı soğutucu eklenmiş reaktörün MCNP kor modeli

Şekil 5.5' de %15 ThO_2 yakıt ve % 0,01, % 0,05, % 0,1, % 0,2 oranlı Al_2O_3 nanoparçacıklı soğutucu eklenmiş reaktörün MCNP kor modeli ve bağıl güç yoğunluk değerleri gösterilmiştir. Gösterilen görsellere göre en yüksek bağıl güç yoğunluğu değeri % 0,01 nanoparçacık oranlı akışkanda 1,09234 olarak elde edilmiştir.



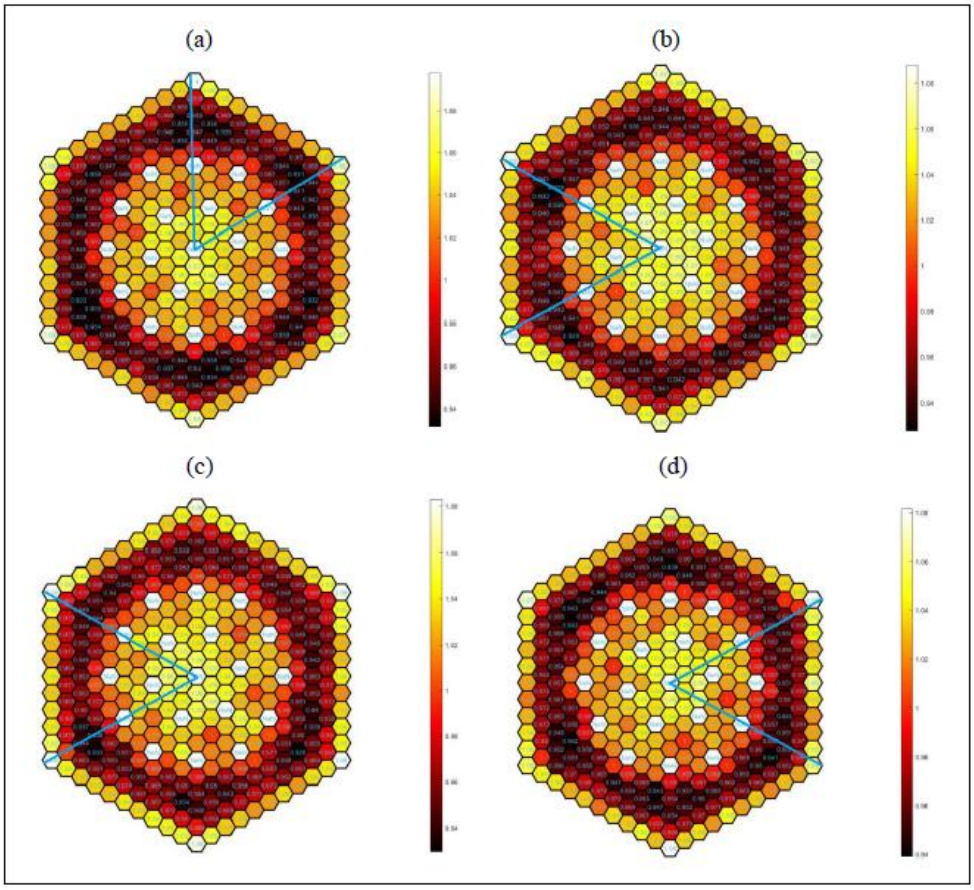
Şekil 5.6. %20 ThO_2 yakıt ve (a) % 0,01, (b) % 0,05, (c) % 0,1, (d) % 0,2 oranlı Al_2O_3 nanoparçacıklı soğutucu eklenmiş reaktörün MCNP kor modeli

Şekil 5.6' da %20 ThO2 yakıt ve % 0,01, % 0,05, % 0,1, % 0,2 oranlı Al2O3 nanoparçacıklı soğutucu eklenmiş reaktörün MCNP kor modeli ve bağıl güç yoğunluk değerleri gösterilmiştir. Gösterilen görsellere göre en yüksek bağıl güç yoğunluğu değeri % 0,05 nanoparçacık oranlı akışkanda 1,08839 olarak elde edilmiştir.



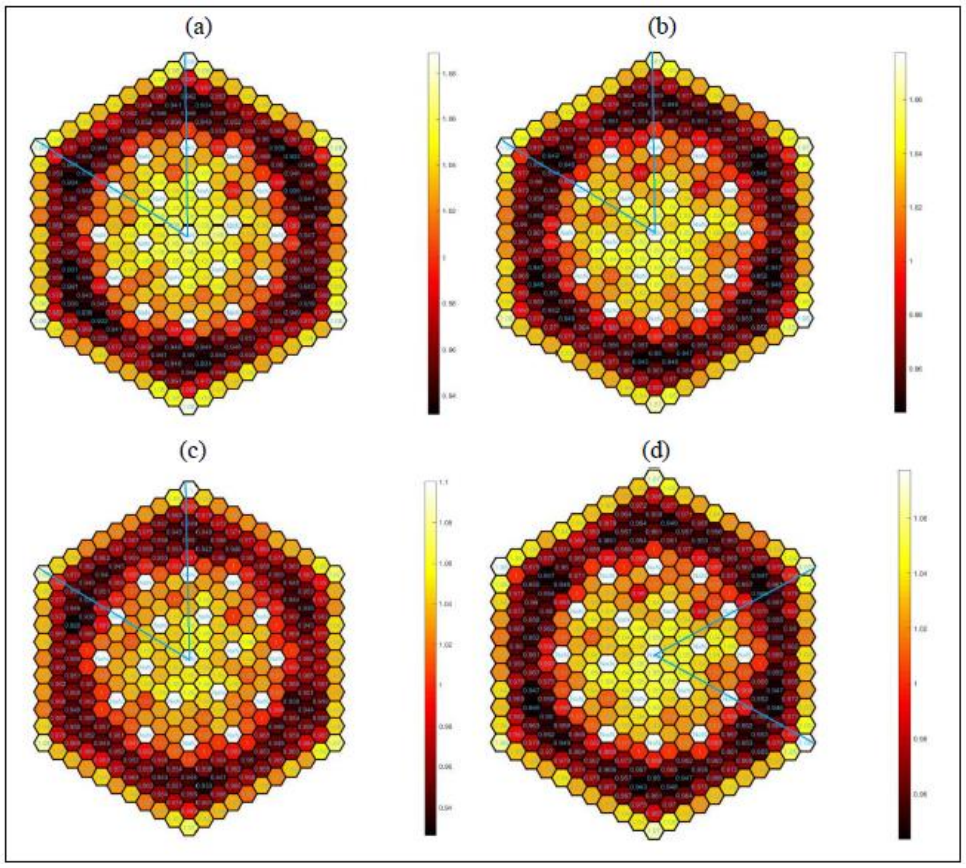
Şekil 5.7. UO_2 yakıt ve (a) % 0,01, (b) % 0,05, (c) % 0,1, (d) % 0,2 oranlı CuO nanoparçacıklı soğutucu eklenmiş reaktörün MCNP kor modeli

Şekil 5.7' de UO_2 yakıt ve % 0,01, % 0,05, % 0,1, % 0,2 oranlı CuO nanoparçacıklı soğutucu eklenmiş reaktörün MCNP kor modeli ve bağıl güç yoğunluk değerleri gösterilmiştir. Gösterilen görsellere göre en yüksek bağıl güç yoğunluğu değeri % 0,01 nanoparçacık oranlı akışkanda 1,095492 olarak elde edilmiştir.



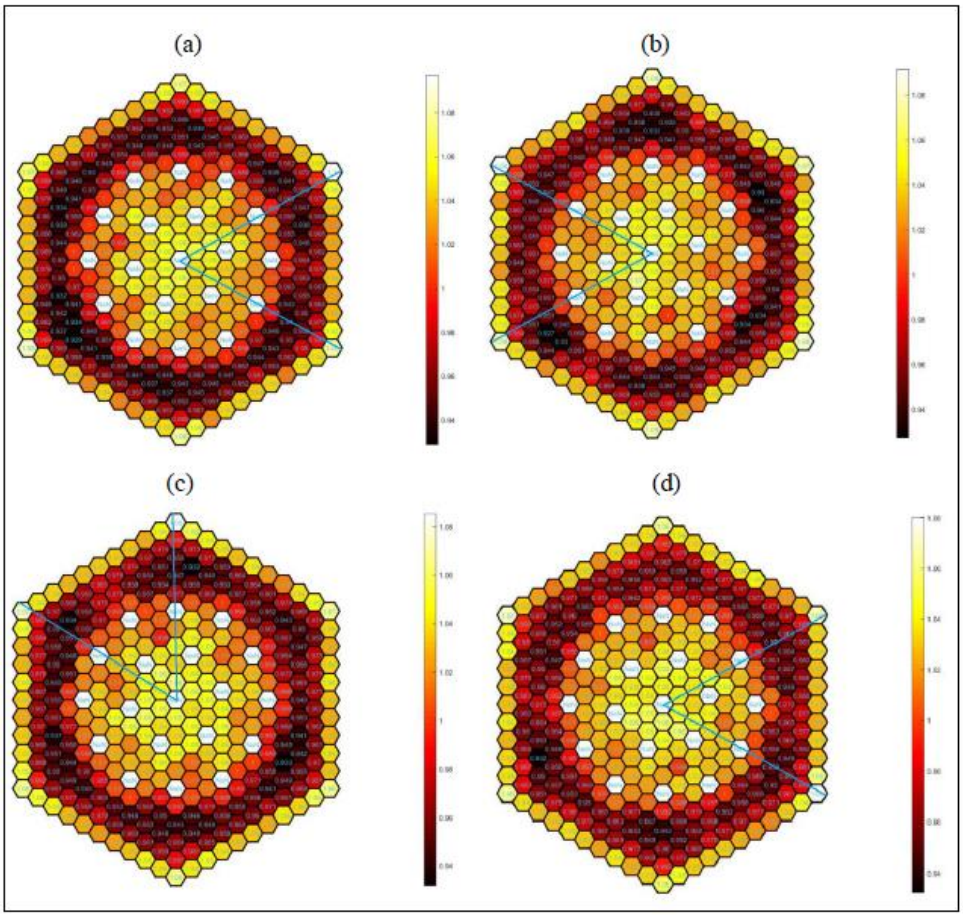
Şekil 5.8. %5 ThO_2 yakıt ve (a) % 0,01, (b) % 0,05, (c) % 0,1, (d) % 0,2 oranlı CuO nanoparçacıklı soğutucu eklenmiş reaktörün MCNP kor modeli

Şekil 5.8' de %5 ThO_2 yakıt ve % 0,01, % 0,05, % 0,1, % 0,2 oranlı CuO nanoparçacıklı soğutucu eklenmiş reaktörün MCNP kor modeli ve bağıl güç yoğunluk değerleri gösterilmiştir. Gösterilen görsellere göre en yüksek bağıl güç yoğunluğu değeri % 0,01 nanoparçacık oranlı akışkanda 1,09759 olarak elde edilmiştir.



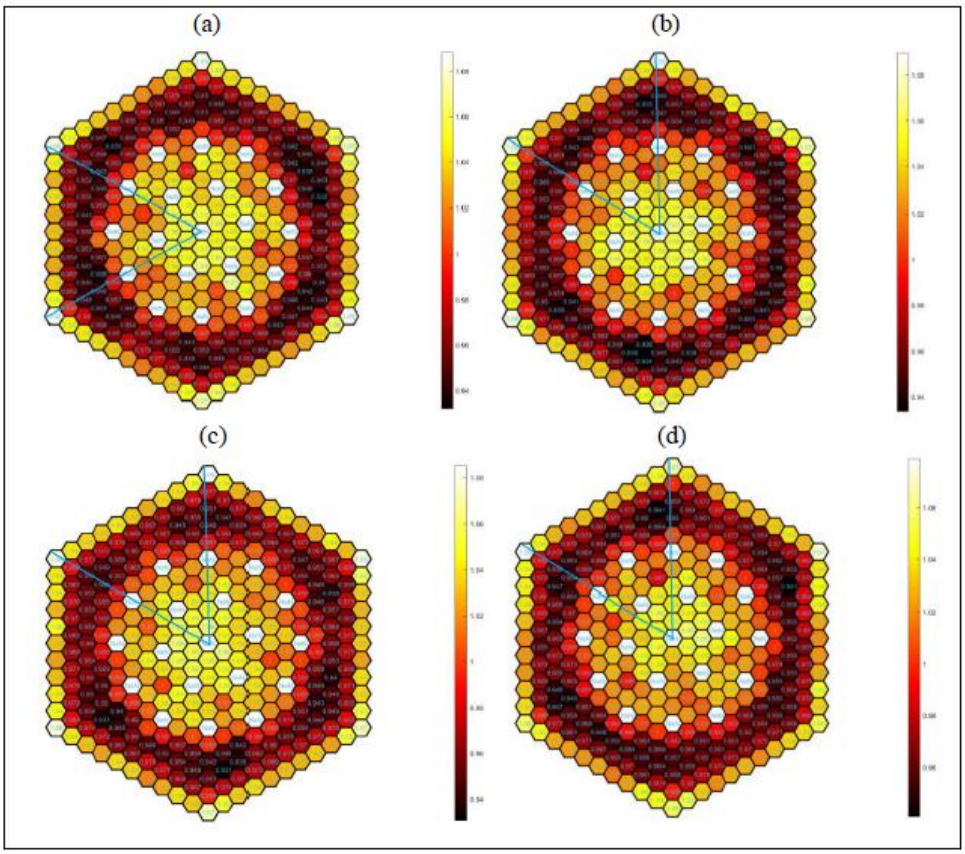
Şekil 5.9. %10 ThO_2 yakıt ve (a) % 0,01, (b) % 0,05, (c) % 0,1, (d) % 0,2 oranlı CuO nanoparçacıklı soğutucu eklenmiş reaktörün MCNP kor modeli

Şekil 5.9' da %10 ThO_2 yakıt ve % 0,01, % 0,05, % 0,1, % 0,2 oranlı CuO nanoparçacıklı soğutucu eklenmiş reaktörün MCNP kor modeli ve bağıl güç yoğunluk değerleri gösterilmiştir. Gösterilen görsellere göre en yüksek bağıl güç yoğunluğu değeri % 0,1 nanoparçacık oranlı akışkanda 1,10020 olarak elde edilmiştir.



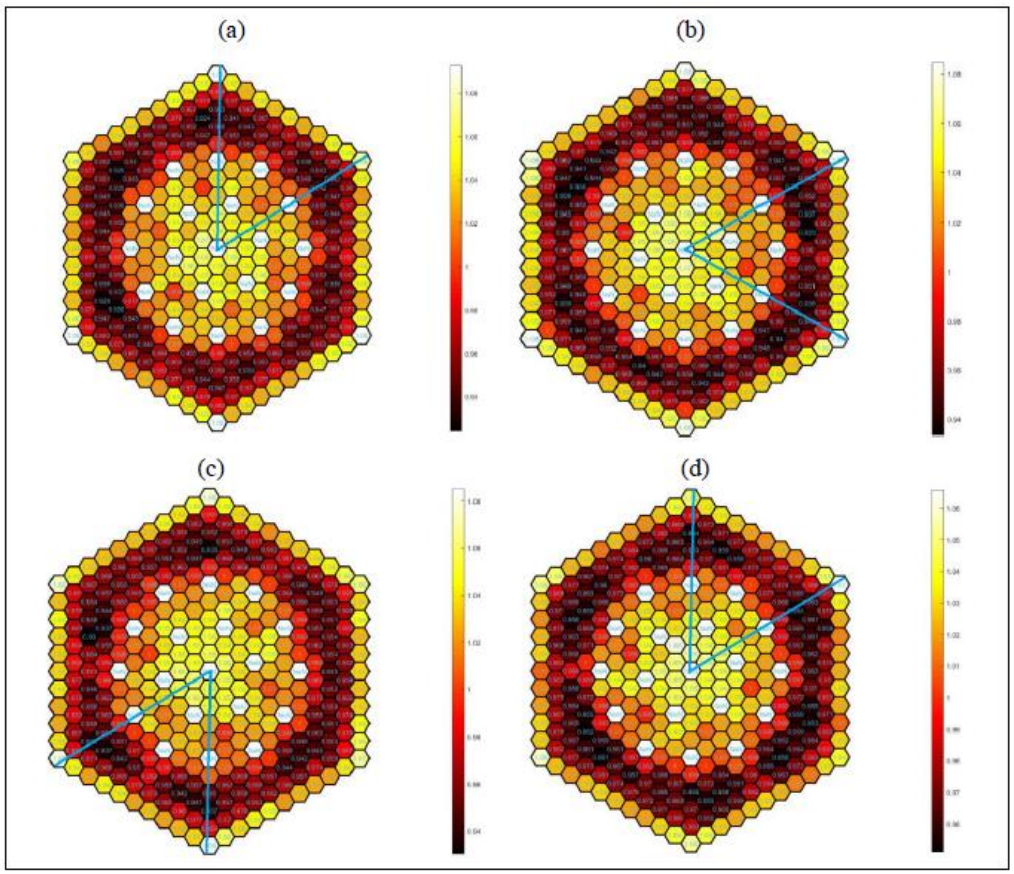
Şekil 5.10. %15 ThO_2 yakıt ve (a) % 0,01, (b) % 0,05, (c) % 0,1, (d) % 0,2 oranlı CuO nanoparçacıklı soğutucu eklenmiş reaktörün MCNP kor modeli

Şekil 5.10' da %15 ThO_2 yakıt ve % 0,01, % 0,05, % 0,1, % 0,2 oranlı CuO nanoparçacıklı soğutucu eklenmiş reaktörün MCNP kor modeli ve bağıl güç yoğunluk değerleri gösterilmiştir. Gösterilen görsellere göre en yüksek bağıl güç yoğunluğu değeri % 0,01 nanoparçacık oranlı akışkanda 1,09722 olarak elde edilmiştir.



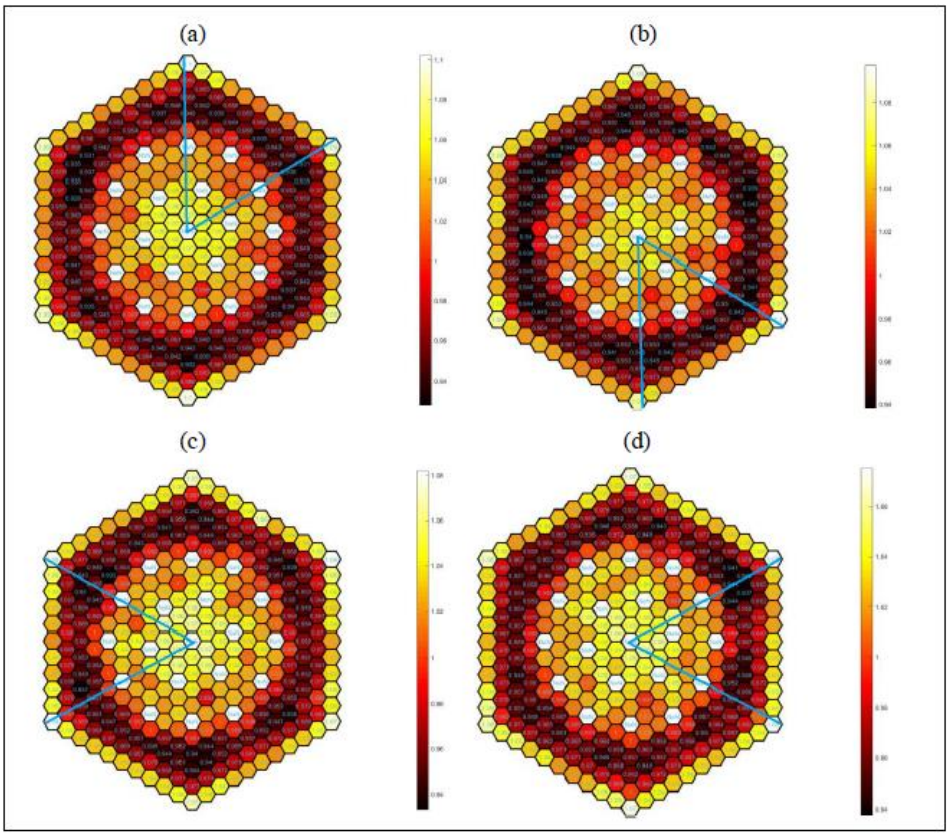
Şekil 5.11. %20 ThO_2 yakıt ve (a) % 0,01, (b) % 0,05, (c) % 0,1, (d) % 0,2 oranlı CuO nanoparçacıklı soğutucu eklenmiş reaktörün MCNP kor modeli

Şekil 5.11' de %20 ThO_2 yakıt ve % 0,01, % 0,05, % 0,1, % 0,2 oranlı CuO nanoparçacıklı soğutucu eklenmiş reaktörün MCNP kor modeli ve bağıl güç yoğunluk değerleri gösterilmiştir. Gösterilen görsellere göre en yüksek bağıl güç yoğunluğu değeri % 0,05 nanoparçacık oranlı akışkanda 1,08964 olarak elde edilmiştir.



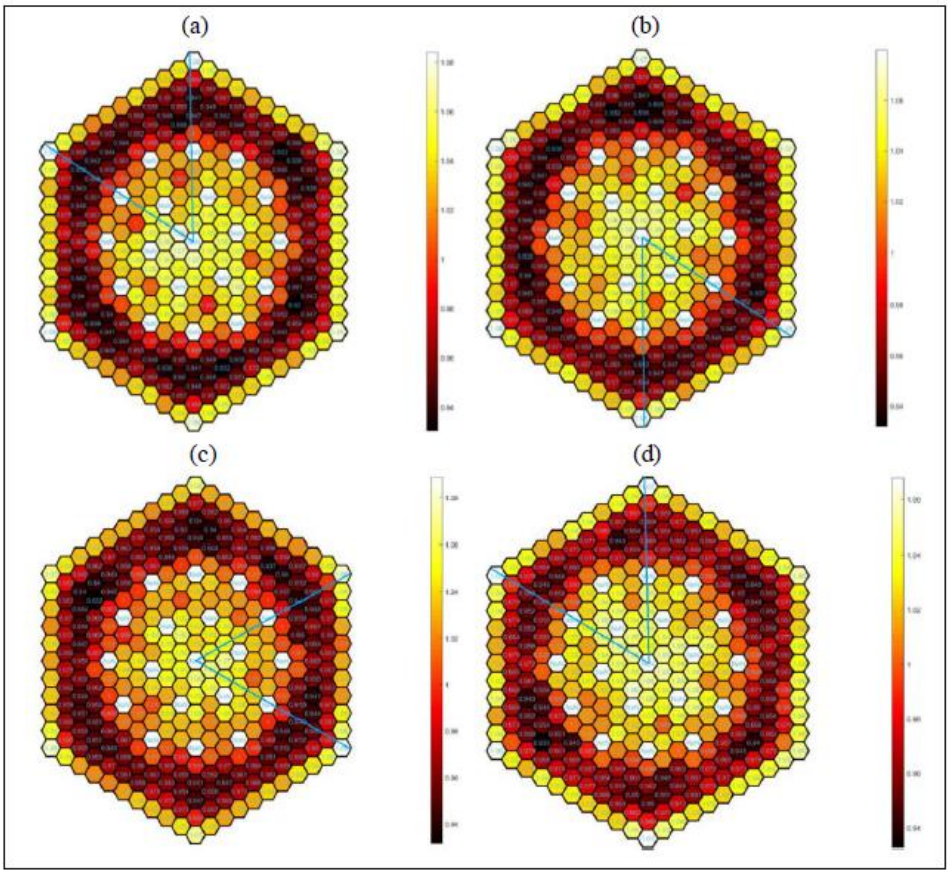
Şekil 5.12. UO_2 yakıt ve (a) % 0,01, (b) % 0,05, (c) % 0,1, (d) % 0,2 oranlı TiO_2 nanoparçacıklı soğutucu eklenmiş reaktörün MCNP kor modeli

Şekil 5.12' de UO_2 yakıt ve % 0,01, % 0,05, % 0,1, % 0,2 oranlı TiO_2 nanoparçacıklı soğutucu eklenmiş reaktörün MCNP kor modeli ve bağıl güç yoğunluk değerleri gösterilmiştir. Gösterilen görsellere göre en yüksek bağıl güç yoğunluğu değeri % 0,01 nanoparçacık oranlı akışkanda 1,092816 olarak elde edilmiştir.



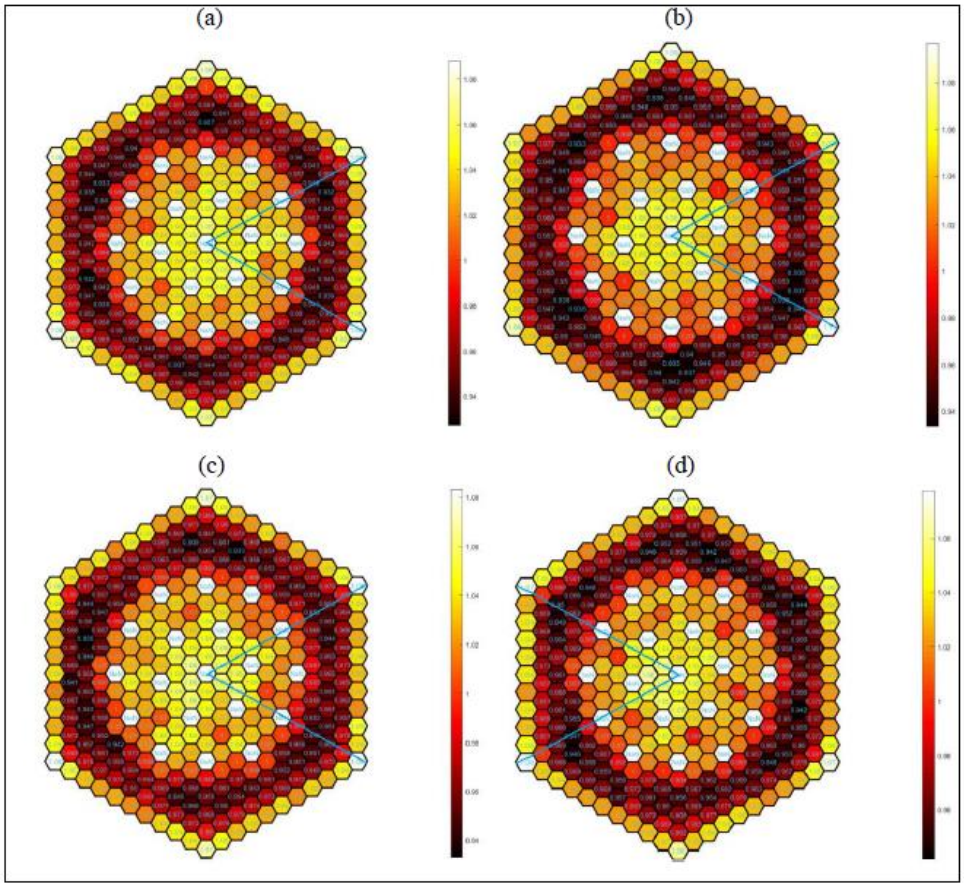
Şekil 5.13. %5 ThO_2 yakıt ve (a) % 0,01, (b) % 0,05, (c) % 0,1, (d) % 0,2 oranlı TiO_2 nanoparçacıklı soğutucu eklenmiş reaktörün MCNP kor modeli

Şekil 5.13' de %5 ThO_2 yakıt ve % 0,01, % 0,05, % 0,1, % 0,2 oranlı TiO_2 nanoparçacıklı soğutucu eklenmiş reaktörün MCNP kor modeli ve bağıl güç yoğunluk değerleri gösterilmiştir. Gösterilen görsellere göre en yüksek bağıl güç yoğunluğu değeri % 0,01 nanoparçacık oranlı akışkanda 1,10218 olarak elde edilmiştir.



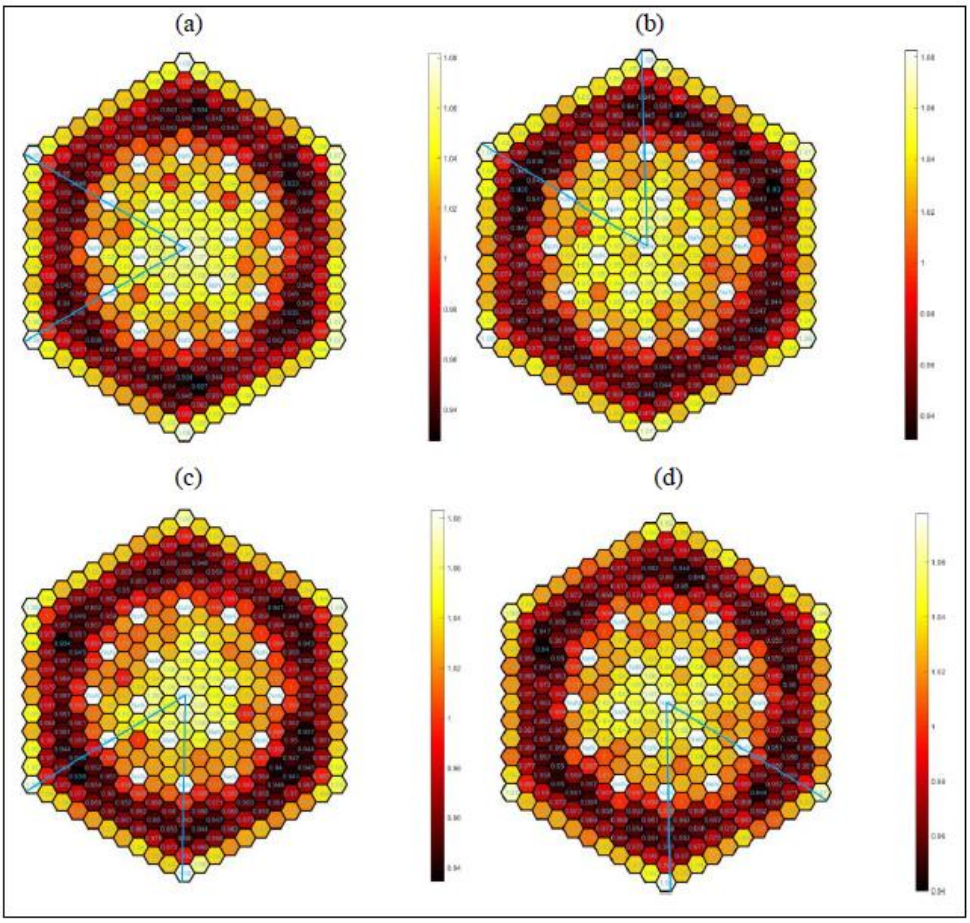
Şekil 5.14. %10 ThO_2 yakıt ve (a) % 0,01, (b) % 0,05, (c) % 0,1, (d) % 0,2 oranlı TiO_2 nanoparçacıklı soğutucu eklenmiş reaktörün MCNP kor modeli

Şekil 5.14' de %10 ThO_2 yakıt ve % 0,01, % 0,05, % 0,1, % 0,2 oranlı TiO_2 nanoparçacıklı soğutucu eklenmiş reaktörün MCNP kor modeli ve bağıl güç yoğunluk değerleri gösterilmiştir. Gösterilen görsellere göre en yüksek bağıl güç yoğunluğu değeri % 0,1 nanoparçacık oranlı akışkanda 1,08889 olarak elde edilmiştir.



Şekil 5.15. %15 ThO_2 yakıt ve (a) % 0,01, (b) % 0,05, (c) % 0,1, (d) % 0,2 oranlı TiO_2 nanoparçacıklı soğutucu eklenmiş reaktörün MCNP kor modeli

Şekil 5.15' de % 15 ThO_2 yakıt ve % 0,01, % 0,05, % 0,1, % 0,2 oranlı TiO_2 nanoparçacıklı soğutucu eklenmiş reaktörün MCNP kor modeli ve bağıl güç yoğunluk değerleri gösterilmiştir. Gösterilen görsellere göre en yüksek bağıl güç yoğunluğu değeri % 0,05 nanoparçacık oranlı akışkanda 1,097107 olarak elde edilmiştir.



Şekil 5.16. % 20 ThO_2 yakıt ve (a) % 0,01, (b) % 0,05, (c) % 0,1, (d) % 0,2 oranlı TiO_2 nanoparçacıklı soğutucu eklenmiş reaktörün MCNP kor modeli

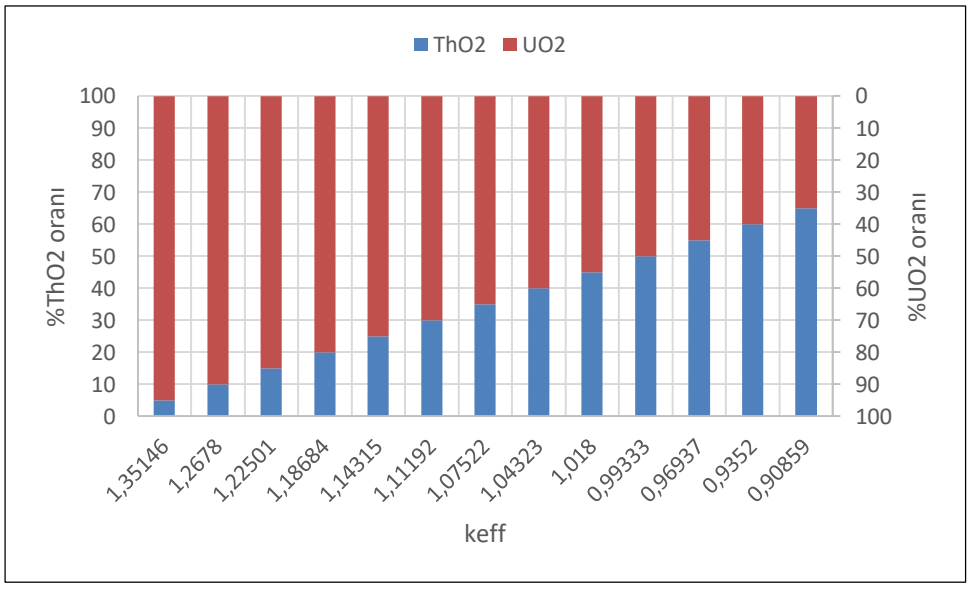
Şekil 5.16' da % 20 ThO_2 yakıt ve % 0,01, % 0,05, % 0,1, % 0,2 oranlı TiO_2 nanoparçacıklı soğutucu eklenmiş reaktörün MCNP kor modeli ve bağıl güç yoğunluk değerleri gösterilmiştir. Gösterilen görsellere göre en yüksek bağıl güç yoğunluğu değeri % 0,1 nanoparçacık oranlı akışkanda 1,083414 olarak elde edilmiştir.

Şekil 5.2 ve Şekil 5.16 arasındaki görsellerde, reaktör kalbindeki en yüksek değerli bağıl güç yoğunluklarının olduğu bölge, mavi üçgen alanla belirtilmiştir. Her bir nanoakışkan türü ve oranına göre, reaktörde en sıcak bağıl güç yoğunluğu değerini veren bölge farklılık göstermiştir.

Nükleer reaktörlerde bağıl güç yoğunluğu dağılımı fisyon reaksiyonlarına bağlı olarak değişmektedir. Başka bir anlatımla güç yoğunluğu dağılımı reaktör yakıt demetinde meydana gelen fisyon yoğunluğu ile orantılıdır. Fisyon enerjisi nükleer reaksiyon sonucu açığa çıkmakta ve bir fisyon reaksiyonu başına yaklaşık 200 MeV enerji açığa çıkmaktadır.

Bu fisyon enerjisinin büyük bir bölümü kinetik enerji olarak açığa çıkmaktadır (Snoj & Ravnik, 2006).

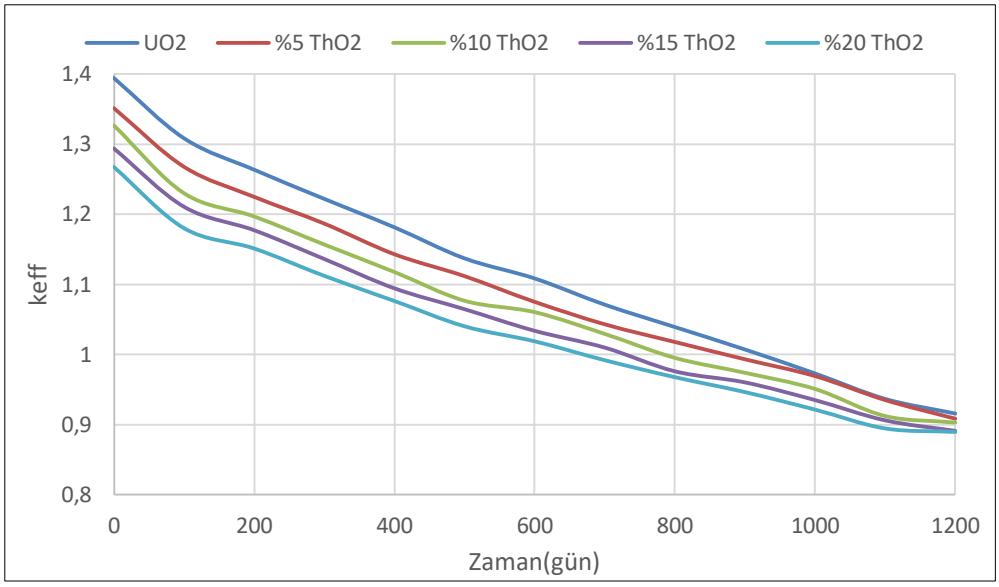
Reaktör korunda fisyon güç yoğunluğu, reaktör korunda kullanılan yakıt türüne göre değişiklik göstermektedir. Yakıt bölgesindeki fisyon güç dağılımı yakıt türüne ve nötron yutulma oranına bağlı olarak değişmektedir. Uranyum yakıtının kullanılması sonucunda ^{235}U izotopu reaksiyon sonucu zamana bağlı olarak yanması sonucu azalacak, buna karşılık reaktör korunda ^{239}Pu ve ^{241}Pu gibi fisil (bölünebilir) izotoplar üreyecektir. Bu üreyen fisil izotoplar termal nötron akılarına bağlı olarak reaktör korunda fisyon güç yoğunluğunun artışı ve azalmasında belirleyici olacaktır. Bunun sebebi ise yüksek kalitedeki fisil izotopların mikroskobik fisyon tesir kesitlerinin ^{235}U izotopuna göre daha yüksek olmasıdır. ($\sigma_{f,th}(^{239}Pu)$ = 742,5 b, $\sigma_{f,th}(^{241}Pu)$ = 1009 b ve $\sigma_{f,th}(^{235}U)$ = 583,5 b. Yani bağıl güç yoğunlukları, fisyon reaksiyonlarına bağlı olarak değişmektedir. Aynı şekilde ^{232}Th nin de yakıt olarak kullanılması sonucu sistemde zamanla ^{232}Th azalacak, ^{233}U artacaktır.



Şekil 5.17. Su soğutuculu (nanoparçacıksız) UO_2- ThO_2 değişen oranlarına karşılık keff değerleri

Şekil 5.17'de nanoparçacık olmaksızın soğutucu olarak sadece su kullanılan reaktör için, ThO_2 ve %3,7 oranında zenginleştirilmiş ve reaktörde homojen olarak yerleştirilmiş UO_2 oranlarına karşılık keff değeri gösterilmiştir. ThO_2 oranının artmasıyla keff değerinin düşmesi grafikte net bir şekilde görülmüştür. Kritiklik değeri 1'e ulaştığında reaktörde yaklaşık %40 oranında ThO_2 ve %60 oranında UO_2 olduğu görülmüştür. Ancak keff

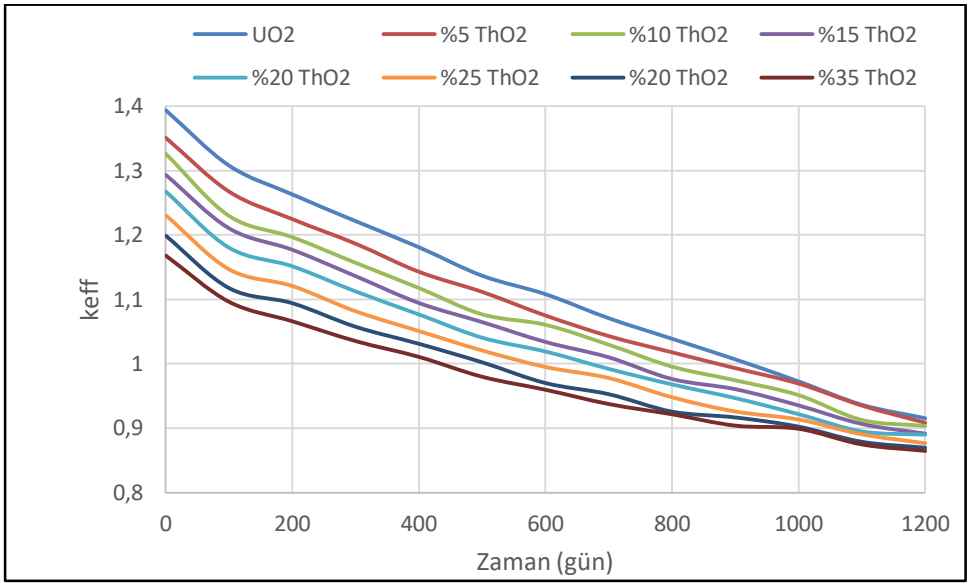
değerinin 1 olduğu anda reaktör çalışmaya başlarsa, reaktör kısa süre sonra kritik altı olacak ve işletme ömrü çok kısa olacaktır.



Şekil 5.18. Homojen dağılımlı UO_2 ve % 5, % 10, % 15 ve % 20 oranında ThO_2 içeren yakıtlı reaktörde zaman karşı keff değişimi

Şekil 5.18'de homojen dağılımlı UO_2 ve % 5, % 10, % 15 ve % 20 oranında ThO_2 içeren yakıt ile nanoparçacık eklenmemiş soğutucu ile reaktörün çalışması sonucu elde edilen keff değerleri gösterilmiştir. Sadece UO_2 yakıt kullanımı için yapılan analizlerde, keff başlangıçta 1,39377 değerini almıştır ve yaklaşık 900 günün sonunda ise 1,00676 değerine düşerek nerdeyse kritik olmuştur. Daha sonra yakıta eklenen ThO_2 'in artan oranıyla keff' in başlangıç değeri düşerek, % 20 ThO_2 eklenmesiyle birlikte en düşük değeri olan 1,267 değerini almıştır.

Bu tez kapsamında ThO_2 yakıtının ele alınan değerleri %5, %10, %15 ve %20 olarak belirlenmiştir. Analizler yapılırken ThO_2 yakıtı %25, %30 ve %35 oranlarında da eklenmiş ancak bu artan oranların keff değerini çok düşürerek, işletme süresini sadece UO_2 yakıtına göre neredeyse yarı değerine kadar kısalttığı belirlenmiş ve bu durum Şekil 5.19' da gösterilmiştir. Bu nedenle ThO_2 oranı bu tez kapsamında en fazla %20 oranında tutulmuştur.



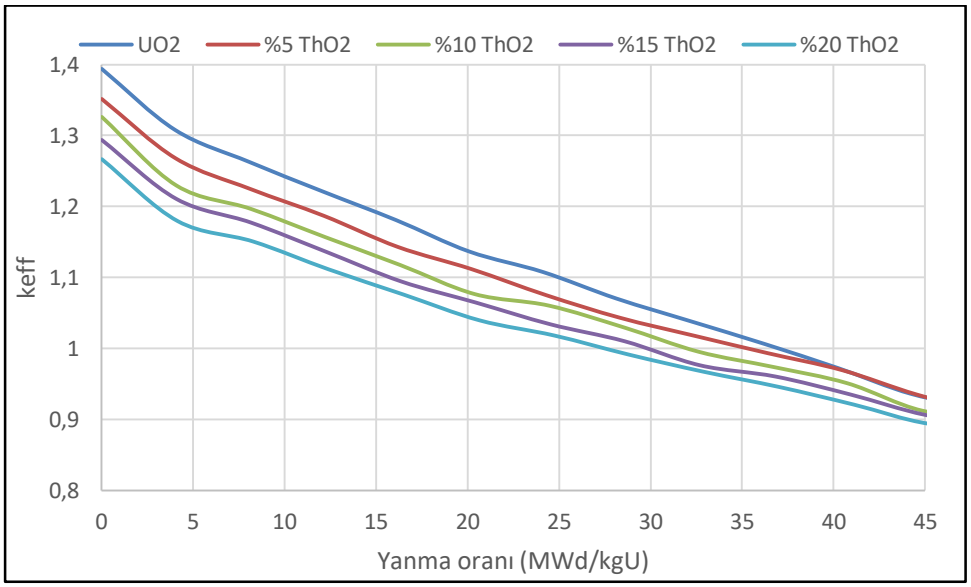
Şekil 5.19. Değişen ThO_2 oranlarına göre zamana bağlı kritiklik değerleri

Nükleer enerji, fisyon tepkimesi sonucu açığa çıkar. Fisyon yapan çekirdekler tarafından salınan nötronlar, diğer bölünebilir (fisil) çekirdeklerin fisyon yapmasına yol açar ve bu böylece devam ederek bir zincir tepkime oluşur. Böyle bir zincir reaksiyonu "k" sembolü ile gösterilir ve çoğaltma faktörü (multiplication factor) olarak ifade edilir. Bu faktör, bir nesildeki fisyon nötronlarının sayısının önceki nesildeki fisyon nötronlarının sayısına oranı olarak tanımlanır. k, 1'den büyük olduğunda, fisyon nötronlarının sayısı bir nesilden diğerine artar. Yani açığa çıkan enerji zamanla artar ve reaktör süperkritik hale gelir. Eğer k 1'den küçükse, fisyonların sayısı zamanla azalır dolayısıyla ortaya çıkan enerji de azalır ve reaktör kritik altı olarak tanımlanır. Son olarak eğer k=1 olursa, zincir tepkimesi sabit bir oranda devam eder ve açığa çıkan enerji kararlı bir şekilde sabit olur ve sistemin bu durumuna da kritik durum denir (Lamarsh & Baratta, n.d.).

Yapılan bu tez kapsamında, artan ThO_2 oranıyla, keff değerinin azaldığı görülmüştür. Bu da toryumun yakıt olarak uranyum yerine kullanılmasının reaktörde ortaya çıkan fisyon enerjisini azaltacağı sonucunu doğurur. Ancak yine de ^{238}U yerine ^{232}Th kullanımı, kritiklik değerini kritik değer olan 1'in çok üstünde çıkarmadığı veya altında düşürmediği için, alternatif yakıt olarak kullanılabileceğini ortaya koymuştur.

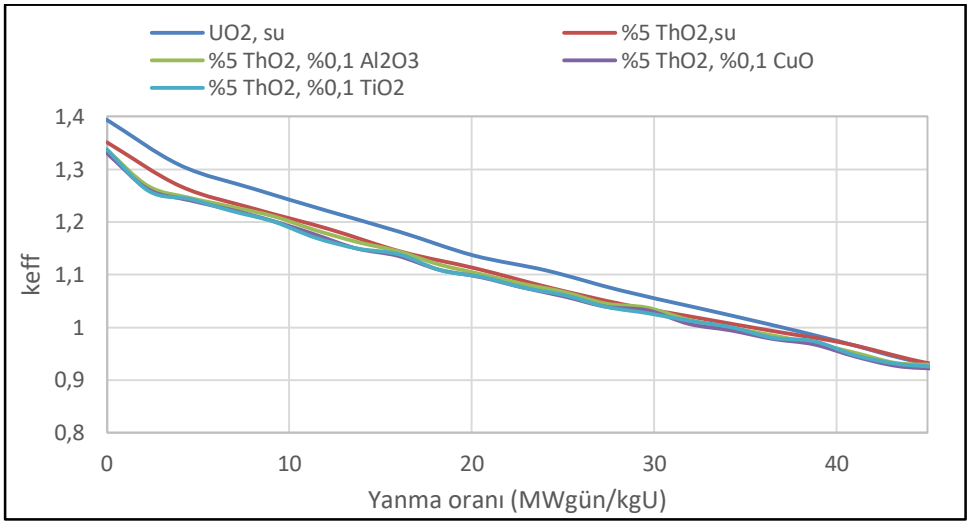
Şekil 5.20 'de , toryumun yakıt içinde kullanımın keff üzerinde oluşturacağı değişimi görmek için, toryum içermeyen ve dört farklı oranda toryum içeren, soğutucu olarak sadece

su kullanan bir VVER-1000 reaktör koru için keff değerlerinin yanma oranlarına karşılık gelen değişimi gösterilmiştir. Bu değerlere göre, yakıta toryum eklenmesi, reaktör korunda üretilen enerjiyi azaltmakta ve bu nedenle keff değerini düşürmektedir.



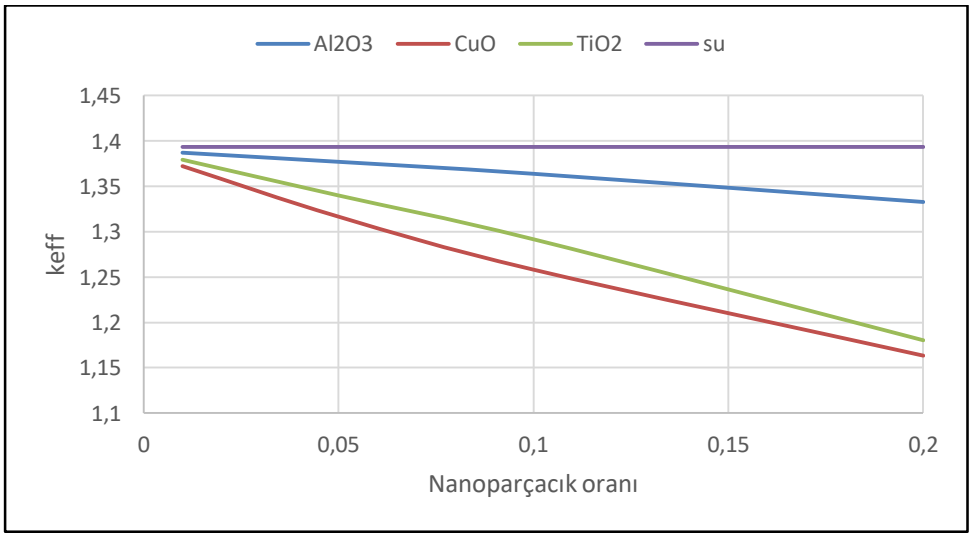
Şekil 5.20. Yanma oranlarının kritiklik değerlerine göre değişimi

Şekil 5.20' de değişen oranlı ThO_2 yakıt ilave edilmiş reaktörde yanma oranlarının (burnup) kritiklik değerina bağlı değişimi verilmiştir. Bu sonuçlara göre, sadece UO_2 yakıt içeren durumda, kritiklik değeri 1'e ulaştığında, yanma değeri 37 MWg/ kgU olarak belirlenirken, %5 ThO_2 içeren yakıt için bu değer 35 MWg/ kgU ve %20 ThO_2 içeren yakıt için ise 27 MWd/ kgU olarak belirlenmiştir.



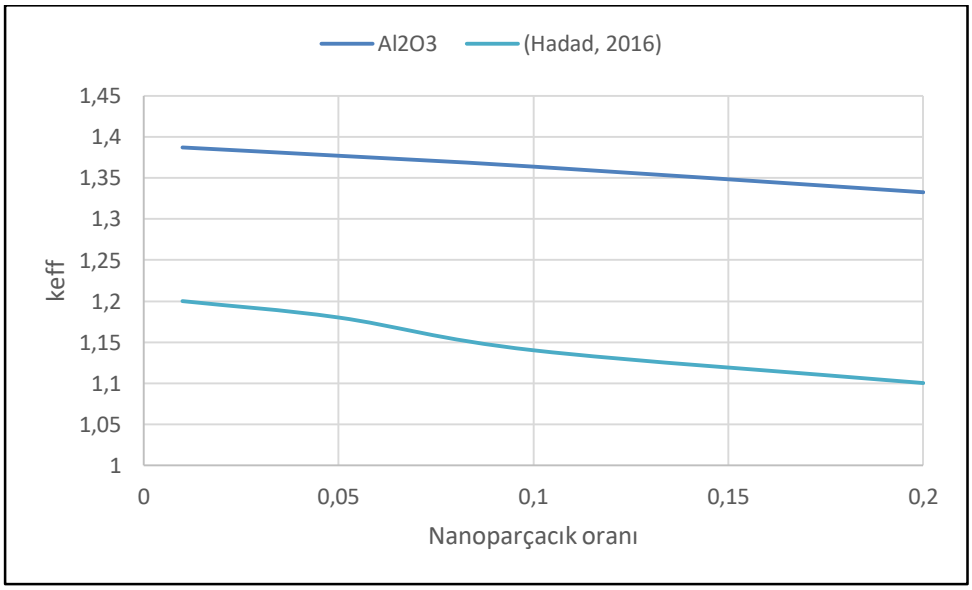
Şekil 5.21. Nanoparçacıklı soğutucu kullanımında, yanma oranlarının kritiklik değerlerine göre değişimi

Şekil 5.21'de UO_2 yakıt ve su soğutucunun keff değerine karşı yanma değerinin yanı sıra, ThO_2 ilaveli yakıt ve nanoparçacık eklenmiş soğutucunun da yanma değerleri kıyaslanmıştır. Grafiğe göre reaktör kritik duruma geldiğinde (k=1), UO_2 yakıt ve su soğutucunun yanma değeri yaklaşık 38 MWg/kgU iken, yakıta ThO_2 eklenmesi kritiklik ve yanma değerlerini düşürmüştür ve kritiklik değerinin 1'e ulaştığı noktada, yanma değeri yaklaşık 35 MWg/kg U değerine düşmüştür. Ve son olarak soğutucuya eklenen nanoparçacıkların etkisiyle, yanma değeri yaklaşık 34 MWg/kgU değerine azalmıştır. Üç farklı nanoparçacık kullanımı durumunda da yanma değerleri birbirine yakın sonuçlar olarak elde edilmiştir.



Şekil 5.22. UO_2 yakıt ve % 0,01, % 0,05, % 0,1, % 0,2 oranlı Al_2O_3, CuO ve TiO_2 nanoparçacıklı soğutucu eklenmiş reaktörün keff değişimi

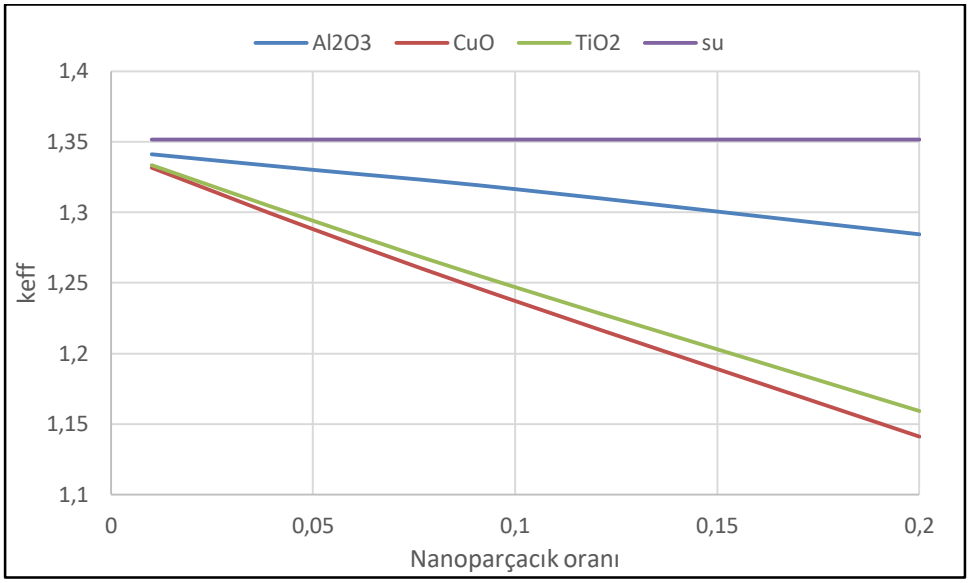
Şekil 5.22' de UO_2 yakıt ve % 0,01, % 0,05, % 0,1, % 0,2 oranlı Al_2O_3, CuO ve TiO_2 nanoparçacıklı soğutucu eklenmiş reaktörün keff değişimi gösterilmiştir. Bu grafiğe göre nanoparçacıkların artan hacim oranlarıyla beraber keff değeri azalmıştır. Referans çalışmalarla (Abdullah et al., 2019)- (Kamal Hadad & Kowsar, 2016) karşılaştırıldığında, yakıt olarak UO_2 kullanan ve Al_2O_3 nanoparçacıkları eklenmiş soğutucu için keff değerinin nanoparçacıkların artan oranlarıyla, benzer bir şekilde azalma eğiliminde olduğu görülmüştür. Artan nanoparçacık oranıyla, nanoparçacık yoğunluğunun artmasının etkisiyle, saçılma (Σ_{SM}) artar. Saçılma tesir kesiti (scattering cross section) su için 0,0505 barn iken, % 0,1 Al_2O_3 için 0,0462 barn' dır (Nourollahi et al., 2019). Ve sonuç olarak bu durum da moderatörün yavaşlatma gücünü ($£_M \Sigma_{SM}$) arttırarak, etkin çoğaltma faktörünün azalmasına sebep olur (Kianpour & Ansarifar, 2019).



Şekil 5.23. UO_2 yakıt ve Al_2O_3 nanoparçacıklı soğutucu eklenmiş reaktörün keff değişimi (referans ile karşılaştırılması)

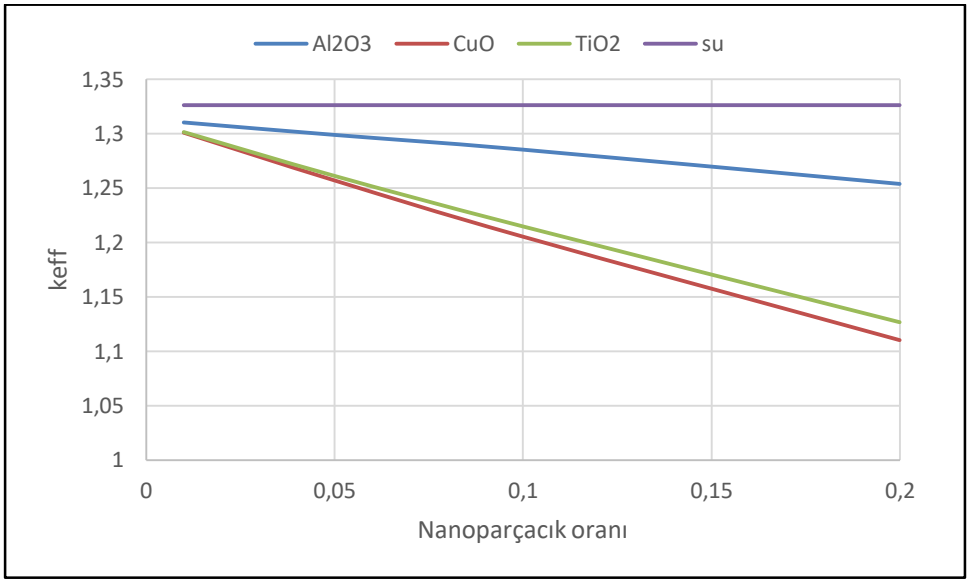
Şekil 5.23'de UO_2 yakıt ve Al_2O_3 nanoparçacığının değişen oranlarına göre, keff değişimi gösterilmiştir. Referans çalışmasında (Kamal Hadad & Kowsar, 2016), keff başlangıç değeri 1,2 olarak belirlenmiş, mevcut tez çalışmasında ise yaklaşık başlangıç değeri 1,4 olarak belirlenmiştir. Bu farkın nedeni bu tez kapsamında homojen olarak kora yerleştirilmiş ve %3,7 zenginlikte UO_2 yakıt kullanılmasıdır. Referans çalışmasında ise değişik zenginliklerde (%1,6, %2,4 ve %3,6) ve heterojen düzende yakıt yerleşimi yapılmıştır.

Kritiklik başlangıç değerleri farklı olsa da, artan nanoparçacık oranıyla gösterdikleri azalma eğilimi benzerdir.



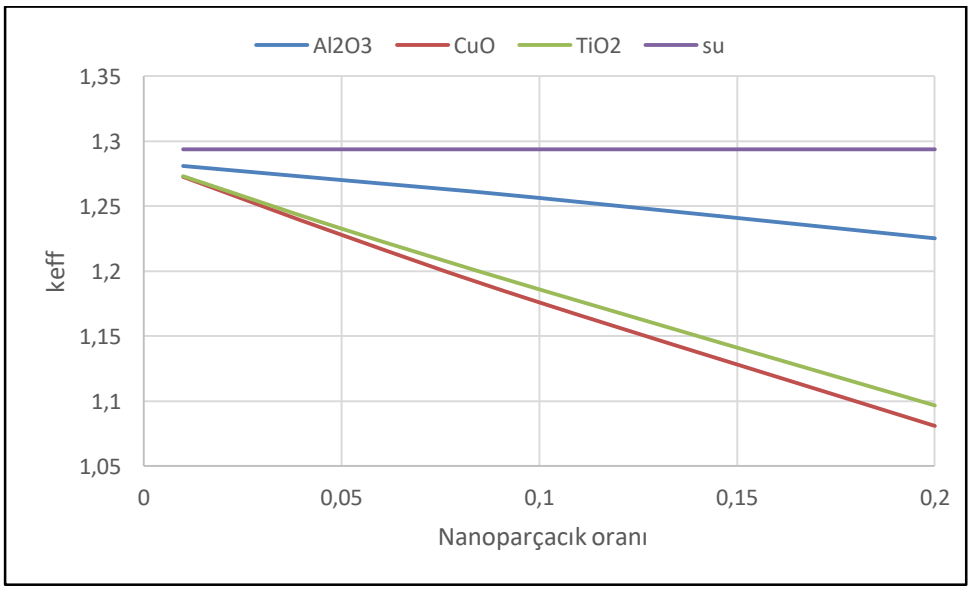
Şekil 5.24. % 5 ThO_2 yakıt ve % 0,01, % 0,05, % 0,1, % 0,2 oranlı Al_2O_3, CuO ve TiO_2 nanoparçacıklı soğutucu eklenmiş reaktörün keff değişimi

Şekil 5.24'de % 5 ThO_2 yakıt ve % 0,01, % 0,05, % 0,1, % 0,2 oranlı Al_2O_3, CuO ve TiO_2 nanoparçacıklı soğutucu eklenmiş reaktörün keff değişimi gösterilmiştir. Bu grafiğe göre nanoparçacıkların artan hacim oranlarıyla beraber keff değeri azalmıştır. Al_2O_3 nanoparçacığı için % 0,01 hacim oranında keff değeri 1,34102 iken, %0,2 hacim oranında 1,28424 olmuştur. Aynı şekilde CuO nanoparçacığı için bu değerler, 1,33167'den 1,14114'e azalmıştır. Ve son olarak da TiO_2 nanoparçacığı için ise keff değeri % 0,01 oranı için, 1,33345 iken, % 0,2 oranında 1,15912 değerini almıştır.



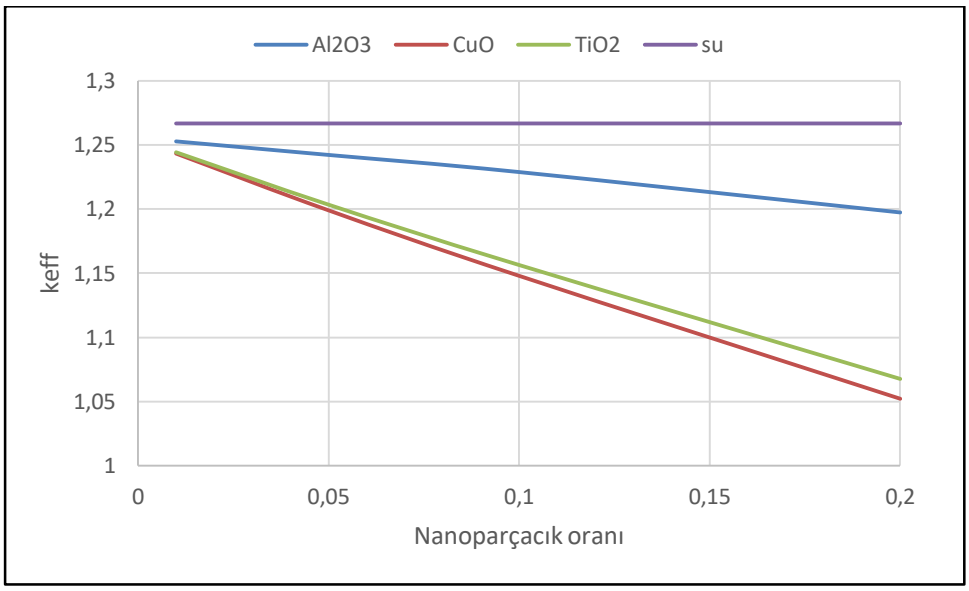
Şekil 5.25. % 10 ThO_2 yakıt ve % 0,01, % 0,05, % 0,1, % 0,2 oranlı Al_2O_3, CuO ve TiO_2 nanoparçacıklı soğutucu eklenmiş reaktörün keff değişimi

Şekil 5.25'de %10 oranında ThO_2 eklenmiş yakıt ile reaktörün çalışması sonucu elde edilne keff değerleri gösterilmiştir. Al_2O_3 nanoparçacığı için % 0,01 hacim oranında keff değeri 1,31021 iken, %0,2 hacim oranında 1,25388 olmuştur. Aynı şekilde CuO nanoparçacığı için bu değerler, 1,30074' den 1,10996' ya azalmıştır. Ve son olarak da TiO_2 nanoparçacığı için ise keff değeri % 0,01 oranı için, 1,30181 iken, % 0,2 oranında 1,1269 değerini almıştır.



Şekil 5.26. % 15 ThO_2 yakıt ve % 0,01, % 0,05, % 0,1, % 0,2 oranlı Al_2O_3, CuO ve TiO_2 nanoparçacıklı soğutucu eklenmiş reaktörün keff değişimi

Şekil 5.26'da %15 oranında ThO_2 eklenmiş yakıt ile reaktörün çalışması sonucu elde edilne keff değerleri gösterilmiştir. Al_2O_3 nanoparçacığı için % 0,01 hacim oranında keff değeri 1,28096 iken, % 0,2 hacim oranında 1,22542 olmuştur. Aynı şekilde CuO nanoparçacığı için bu değerler, 1,27246' dan 1,08079' a azalmıştır. Ve son olarak da TiO_2 nanoparçacığı için ise keff değeri % 0,01 oranı için, 1,27307 iken, % 0,2 oranında 1,0967 değerini almıştır.



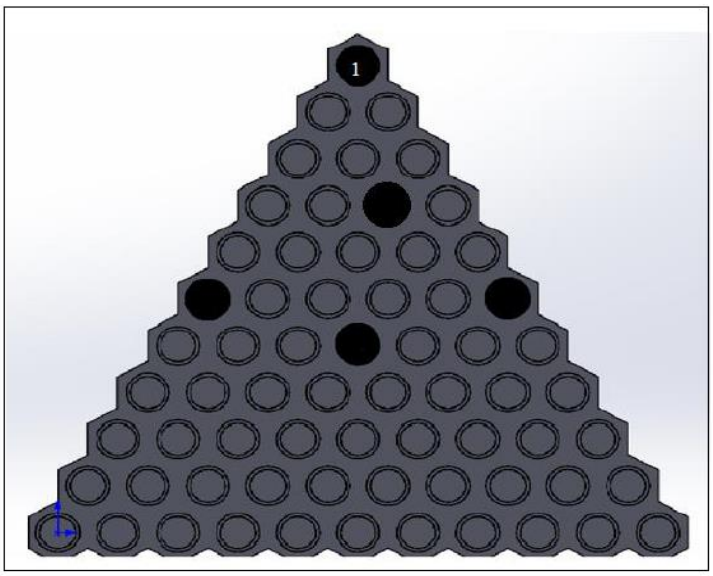
Şekil 5.27. % 20 ThO_2 yakıt ve % 0,01, % 0,05, % 0,1, % 0,2 oranlı Al_2O_3, CuO ve TiO_2 nanoparçacıklı soğutucu eklenmiş reaktörün keff değişimi

Şekil 5.27'de %20 oranında ThO_2 eklenmiş yakıt ile reaktörün çalışması sonucu elde edilen keff değerleri gösterilmiştir. Al_2O_3 nanoparçacığı için % 0,01 hacim oranında keff değeri 1,25308 iken, %0,2 hacim oranında 1,19749 olmuştur. Aynı şekilde CuO nanoparçacığı için bu değerler, 1,24355' den 1,05209' a azalmıştır. Ve son olarak da TiO_2 nanoparçacığı için ise keff değeri % 0,01 oranı için, 1,24461 iken, % 0,2 oranında 1,0675 değerini almıştır.

5.2. COBRA IV PC Analiz Sonuçları

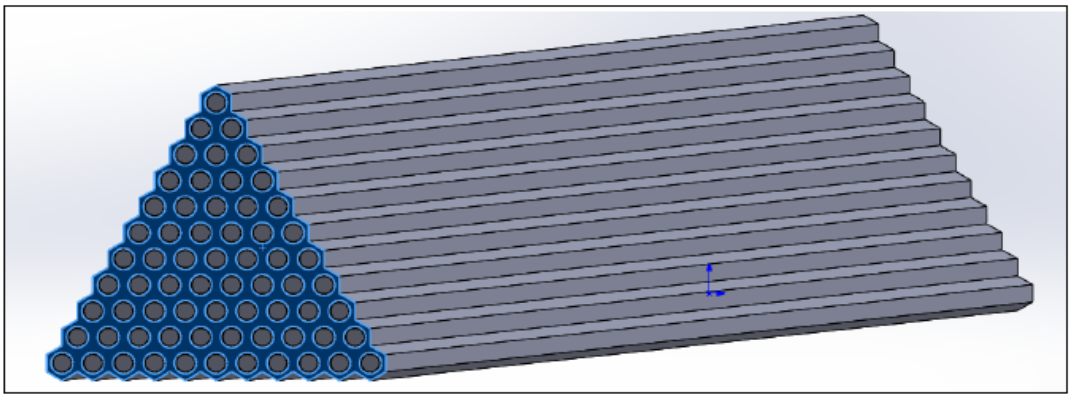
Bu bölümde, VVER 1000 nükleer reaktörü için, termal hidrolik kod COBRA IV PC kullanılarak, nükleer reaktör korunda termal hidrolik analiz yapılmıştır. Yapılan hesaplamalarda, kanal boyunca gerçekleşen sıcaklık değişimi, DNBR değişimi ve yakıt çubuklarında oluşan sıcaklık değerleri hesaplanmıştır. Yapılan bu çalışmada MCNP kodundan elde edilen güç yoğunluk değerleri COBRA IV PC kodunda kullanılarak kanal boyunca oluşan termo fiziksel özellikler elde edilmiştir.

VVER-100 reaktörünün altıgen olan yakıt kalbi 163 tane yakıt demeti içermektedir. Her yakıt demeti arasında akış gerçekleşmekte, akışın gerçekleştiği bu alanlara da kanal denilmektedir. Kanallarda ki akışı incelemek için bu kanalların alt kanallara (subchannel) bölünmesi gerekir. COBRA girdisinde kullanılacak alt kanal sayısı tamamen kullanıcının tercihine kalmıştır. Bu çalışma kapsamında 53 adet alt kanal olduğu kabul edilerek modelleme yapılmıştır (Şekil 5.26). Modelleme kor bölgesinin tamamına uygulanabilceği gibi, geometrik anlamda kolaylık olması ve VVER-1000 reaktörünün simetrik kor yapısından dolayı, korun 1/6 'lik kısmı için yapılmıştır.



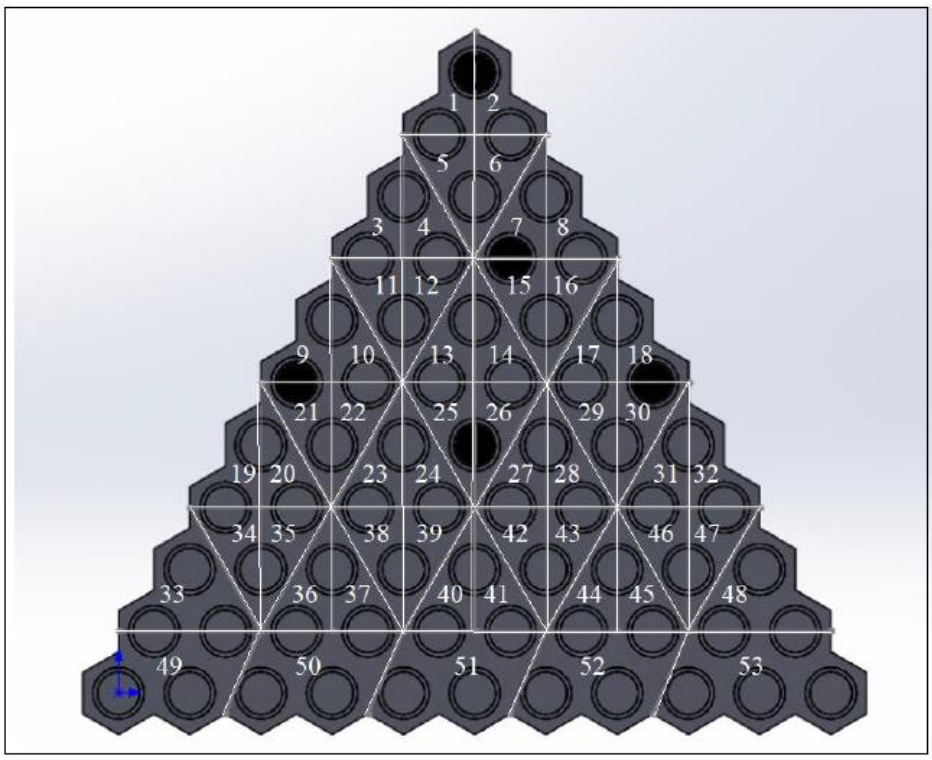
Şekil 5.28. Bir yakıt demetinin 1/6 modelinin üstten görünümü

Mevcut modelde 61 adet yakıt çubuğu ve 4 adet de kılavuz tüpü (guide tube) bulunmaktadır. 1 numaralı yer ise reaktörün merkez bölgesidir.



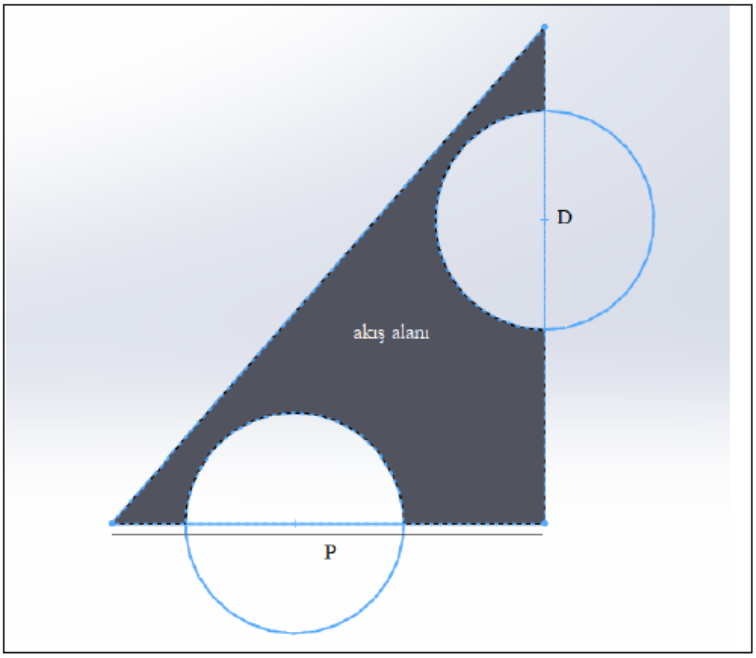
Şekil 5.29. Bir yakıt demetinin 1/6 sının görüntüsü

Şekil 5.29 ’da bir yakıt demetinin 1/6 sının üç boyutlu görüntüsü verilmiştir. Mavi ile gösterilen bölge akış alanıdır. Kanal boyunca gerçekleşen akış sonucu, soğutucu akışkanın sıcaklık ve DNBR değerleri elde edilmiştir.



Şekil 5.30. 1/6 lık reaktör korunun kanal modellemesi

Akış analizini yapabilmek için, akış alanı alt kanallara ayrılır. COBRA IV PC kodu kullanıcısının tercihine kalmış modellemede, ne kadar çok alt kanal olursa, analizin o kadar sağlıklı olacağı bilinmektedir. Bu tez kapsamında korun 1/6’lık kısmı 53 alt kanala bölünmüş ve analiz buna göre yapılmıştır (Şekil 5.30). Belirlenen her bir kanal için akış alanı, ıslanan çevre (soğutucu akışkan ile temas eden toplam yakıt çubuğu ve kılavuz tüpü çevresi) ve ısınan çevre (belirlenen kanal içinde ki yakıt çubuğunun toplam çevresi) Eş.5.1’ de ki ifadeler kullanılıp hesaplanarak, COBRA IV PC kodunda kullanılmıştır.



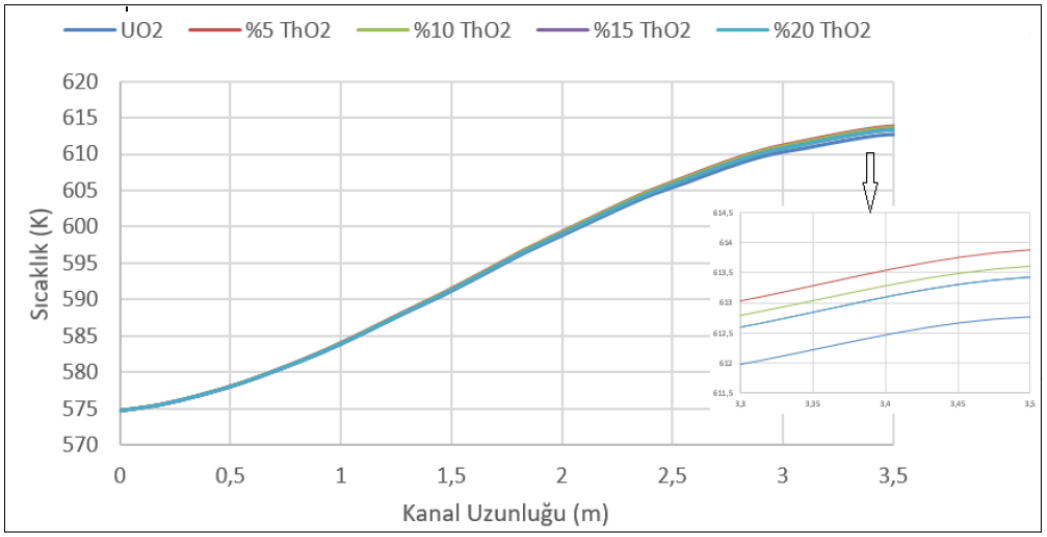
Şekil 5.31. Modellenen bir kanalın akış alanı gösterimi

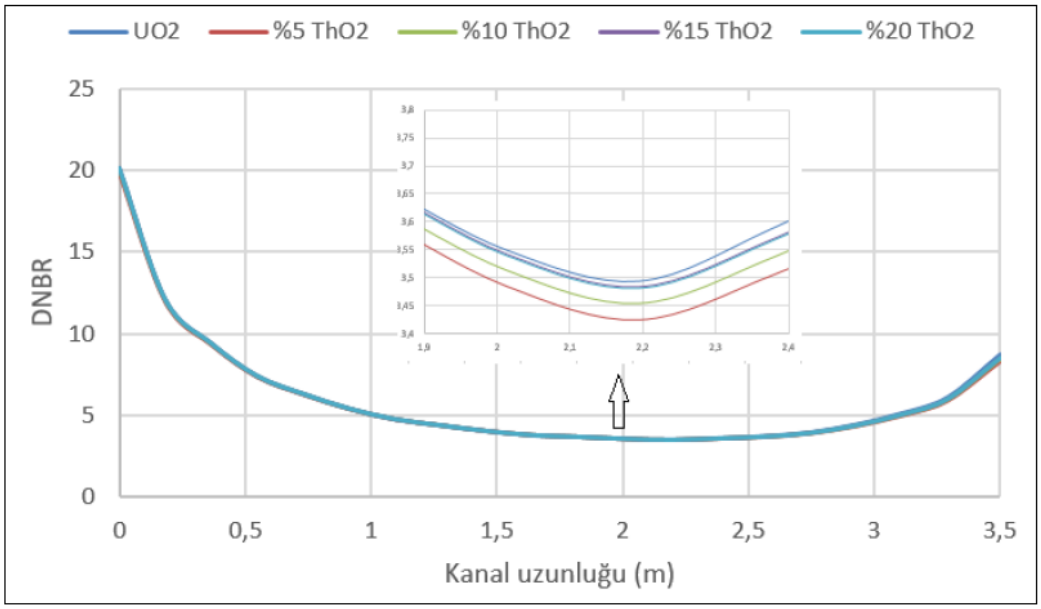
$$\text{Akış alanı} = \frac{P^2}{2} - \frac{\pi D_{yakıtçubuğu}^2}{4} \tag{5.1}$$

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

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

Eş. 5.1'de verilen ifadelerle, her bir kanal için akış alanı hesapları yapılmıştır. Daha sonra bağıl güç yoğunluğu değerleri ve reaktörün geometrik ve tasarım özellikleri ile birlikte hazırlanan COBRA IV PC kodu çalıştırılmış ve reaktör için büyük önem arzeden termal sonuçlara ulaşılmıştır. Şekil 5.32ve Şekil 5.44 arasındaki görsellerde de bu sonuçlara değinilmiştir.



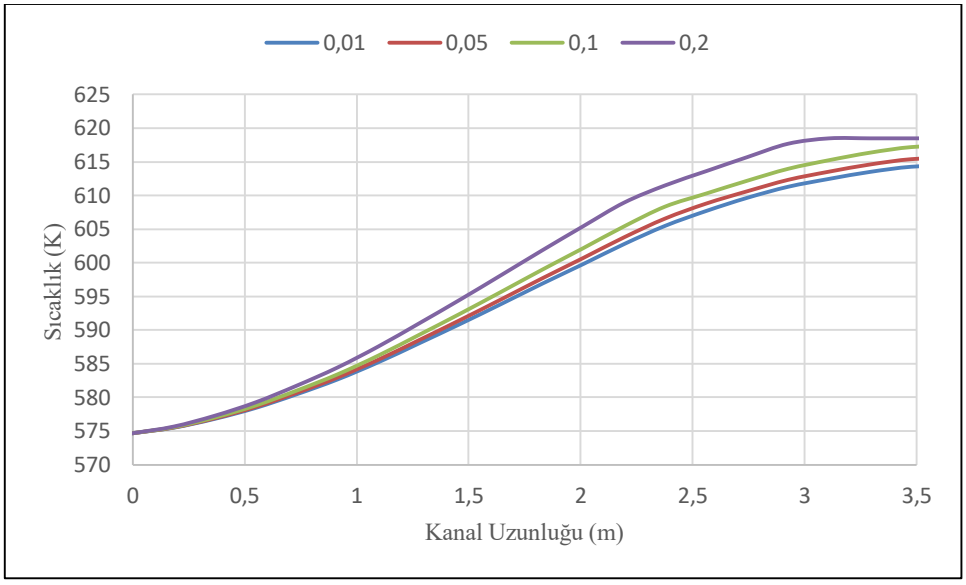


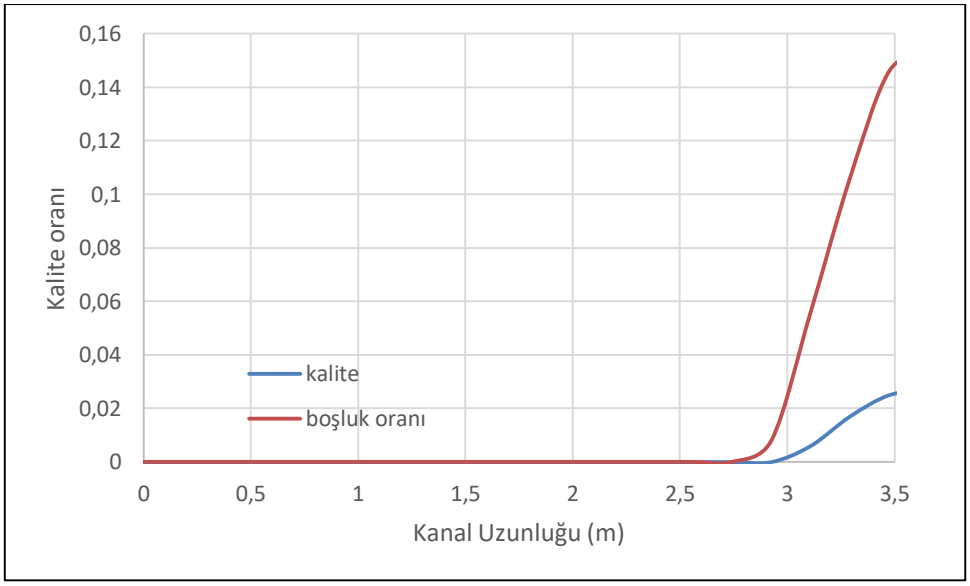
Şekil 5.32. %3,7 zenginlikteki UO_2 yakıt ve % 5, % 10, % 15 ve % 20 ThO_2 içeren yakıt ve sadece su içeren soğutuculu reaktörün sıcaklık ve DNBR değişimi

Nanoakışkan etkisini daha iyi gözlemleyebilmek için, öncelikle homojen şekilde % 3,7 zenginlikte UO_2 ve % 5, % 10, % 15 ve % 20 ThO_2 içeren yakıt için, soğutucuya nanoakışkan eklenmeden termal analiz yapılmıştır. Elde edilen değerlere göre yakıt olarak sadece UO_2 kullanıldığında, kanal sonunda akışkanın ulaştığı maksimum sıcaklık 612,68 K iken, bu değer %5 ThO_2 içeren yakıt kullanıldığında 613,92 K'e çıkmıştır. Daha sonra ThO_2 oranı arttıkça, tekrar azalmaya başlamıştır. Yani eğer yakıtta toryum kullanılacaksa, soğutucu sıcaklık için en yüksek değeri veren % 5 oranında ThO_2 kullanılması en uygunu olacaktır.

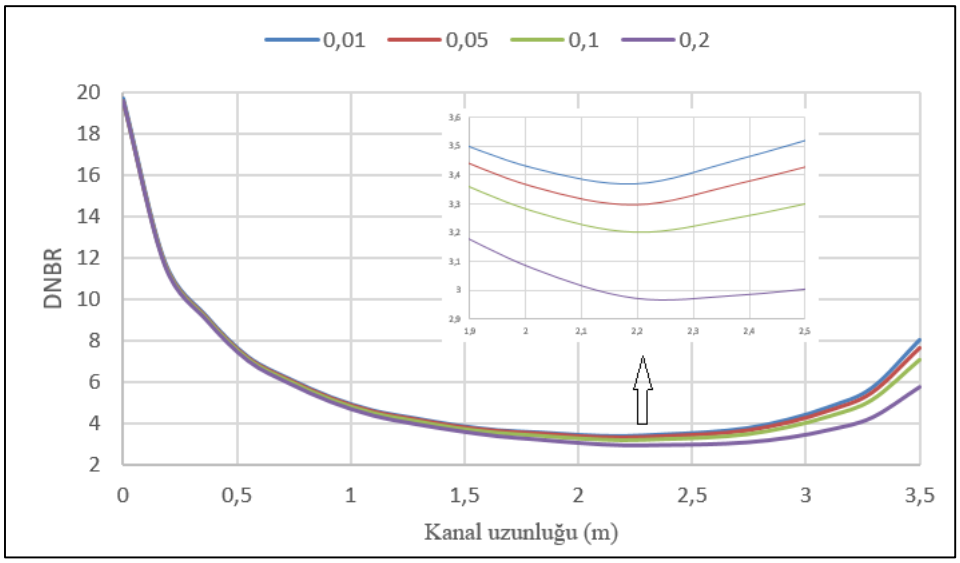
DNBR değeri incelendiğinde ise, en düşük DNBR değeri sıcaklığın artmasına bağlı olarak yine % 5 ThO_2 oranında elde edilmiştir (Şekil 5.32).

Nanoakışkan etkisini gözlemlemek için, yine aynı yakıtlara bu kez farklı tür ve oranda nanoparçacık eklenmiş ve sıcaklık ile DNBR değişimleri incelenmiştir.





Şekil 5.33. % 5 ThO_2 yakıt ve % 0,01, % 0,05, % 0,1, % 0,2 oranlı Al_2O_3 nanoparçacıklı soğutucu eklenmiş reaktörün sıcaklık değişimi, % 0,2 oranında nanoparçacık eklenmiş soğutucunun kalite değişimi ve DNBR değişimi



Şekil 5.33. (devam)% 5 ThO_2 yakıt ve % 0,01, % 0,05, % 0,1, % 0,2 oranlı Al_2O_3 nanoparçacıklı soğutucu eklenmiş reaktörün sıcaklık değişimi, % 0,2 oranında nanoparçacık eklenmiş soğutucunun kalite değişimi ve DNBR değişimi

Yakıt kanallarındaki sıcaklık değişimini incelemek için COBRA çıktısı kullanılmıştır. COBRA tüm yakıt kanalları için sıcaklık bilgilerini vermektedir ancak bu çalışmada en sıcak yakıt kanalı incelenmiştir. Çünkü en sıcak yakıt kanalı güvenlik sınırları içinde kalırsa, diğer yakıt kanalları daha düşük yakıt sıcaklıklarına sahip olacaklarından kaza riski yada ergime vb. problemeler oluşmayacaktır.

Nükleer santraller soğutma görevini sürdürecek soğutucu akışkan suyu sağlamak için, deniz, göl veya ırmak yakınlarına kurulurlar. Böylece nükleer reaktör sistemine su çekerken kolaylık sağlanmış olur. Soğutucu suyunun su kaynağından alınıp, sisteme girdikten sonra sürekli olarak ısınarak, giriş sıcaklığından daha yüksek sıcaklıkta sistemden çıkması olması beklenen bir durumdur. Akışkan sisteme girdikten sonra reaktörün içinde fisyondan üretilen yüksek miktardaki ısı enerjisini sürekli olarak soğutucu akışkana aktarılmaktadır. Ve böylece ısınarak kor boyunca yukarı doğru çıkmaktadır. Daha sonra türbin ve yoğuşturucu sistemlerinden geçerek enerjisini azaltır ve tekrar kullanılmak üzere reaktörün ısı üreten bölümüne gönderilir.

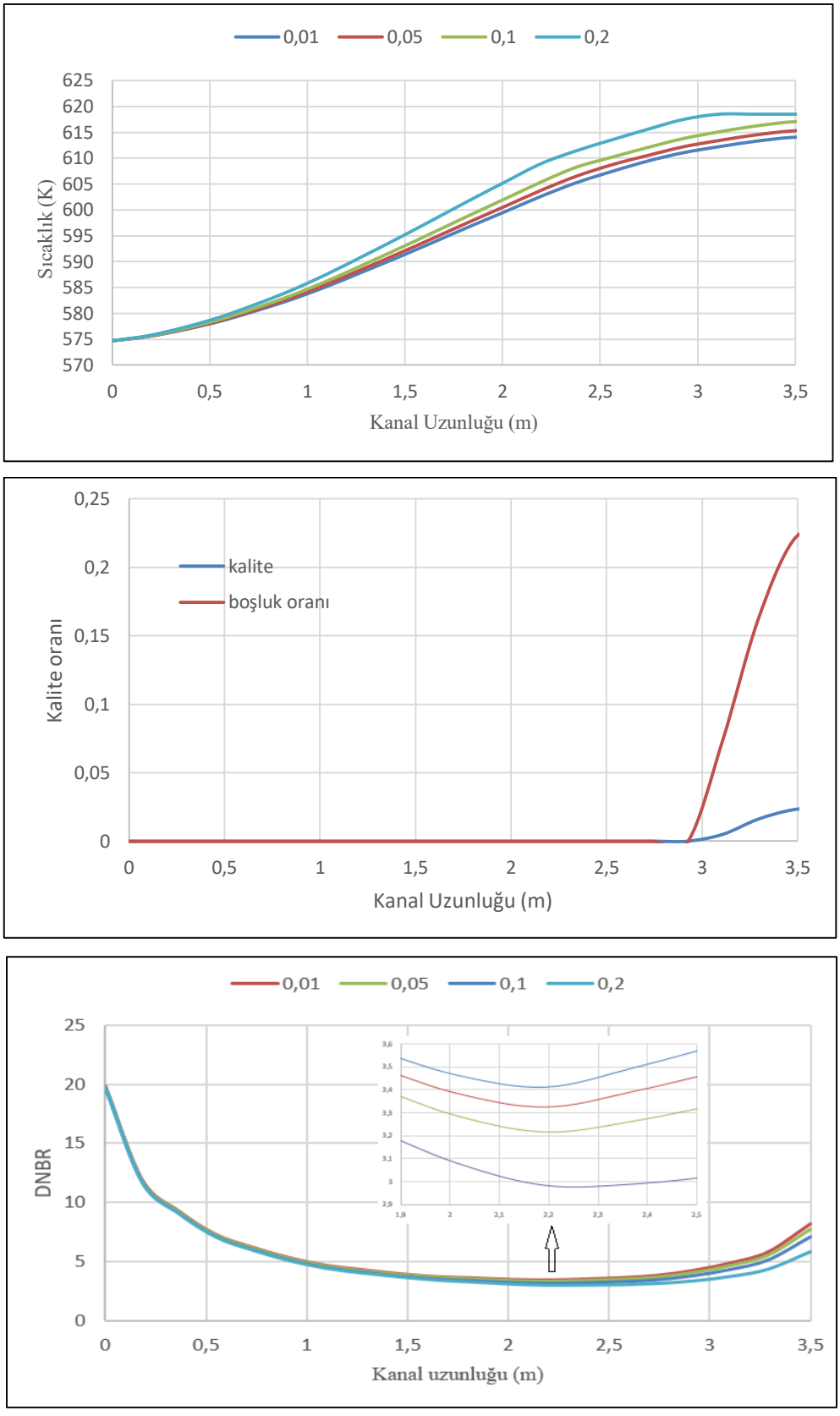
Önemli bir güvenlik faktörü olarak DNBR, reaktörün tam güç çalışması sırasında hesaplanır. Nükleer santral güvenliğinde önemli bir parametredir ve ısı akısını film kaynama bölgesine girmemesi için sınırlar. Şekil 5.33 'de % 5 ThO_2 yakıt ve % 0,01, % 0,05, % 0,1, % 0,2

oranlı Al_2O_3 nanoparçacıklı soğutucu eklenmiş reaktörün sıcaklık ve DNBR değerleri incelenmiştir. Reaktör koruna 575 K sıcaklığında giren soğutucu akışkan, değişik hacim oranlarında ki nano akışkanın artmasıyla, kanal boyunca gerçekleştirdiği akış sonunda en yüksek sıcaklığını % 0,1 hacimli nanoakışkanda alarak yaklaşık 617,5 K sıcaklığına ulaşmaktadır. Nanoparçacık olmaksızın %5 oranında ThO_2 tabanlı yakıt kullanıldığında kanal sonu soğutucu sıcaklığı 613,92 K olarak belirlenmişti. Yani soğutucuya eklenen % 0,1 oranında ki Al_2O_3 nanoparçacığı, sıcaklıkta yaklaşık 3,5 derecelik bir artış sağlamıştır. Soğutucu akışkana eklenen nano parçacık oranının % 0,2 'ye çıkmasıyla ise, akışkan kanal sonuna yaklaştıkça kaynama başlamaktadır. Bu durum Şekil 5.33b' de gösterilmiştir. Boşluk oranı (void fraction) ve kalite (quality) değerleri, bir basınçlı su reaktöründe artış eğiliminde olmamalıdır, ancak reaktöre eklenen % 0,2 hacimli nanoparçacıkta, bu parametreler değer kazanmıştır.

Sıvı yavaşlatıcılı ve soğutuculu bir reaktörde, sıvının kaynadığı bir noktada buhar tarafından kaplanan hacim bir boşluktur çünkü buharın yoğunluğu sıvının yoğunluğundan çok daha küçüktür. Boşluk oranı, boşluklar tarafından kaplanan hacmin, verilen toplam hacme oranıdır. Bir reaktörde boşluk oranının değişmesi sistemin reaktivitesini etkiler. Reaktivitede artışa yol açan bu değişim istenilmeyen bir durumdur. Çünkü reaktivitede meydana gelen artış, güçte de artış olmasına neden olur. Bu da daha fazla kaynama ve boşluğa yol açar, sonrasında reaktivitede tekrar bir artışa neden olur. Bu da sıvının çoğu kaynayana ve kor eriyene kadar bu şekilde devam eder.

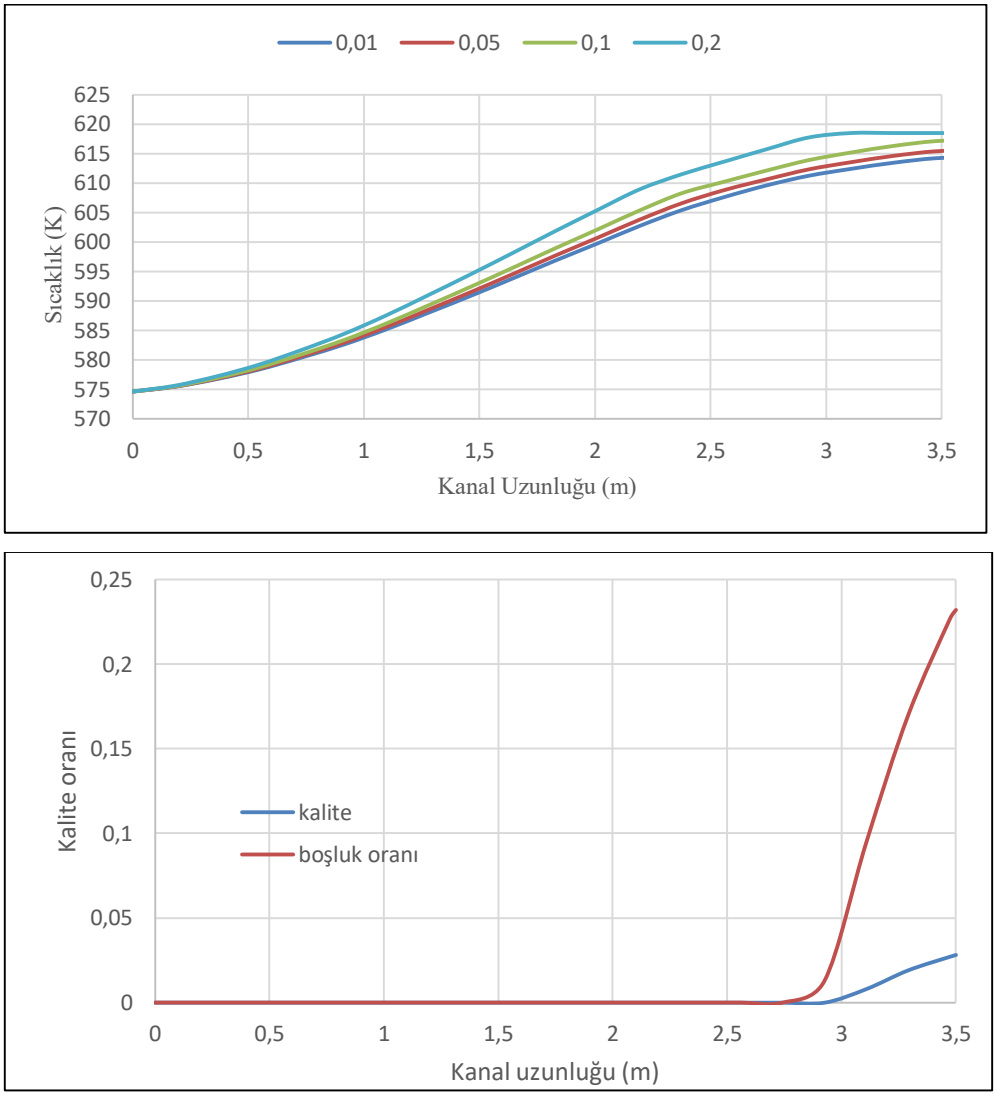
Her ne kadar DNBR değeri güvenlik limitlerinin altında kalmasa da bir basınçlı su reaktöründe dizayn parametreleri gereği kaynama olmaması gerekir. Bu nedenle % 0,2 hacimli nanoakışkanın kullanılması tercih edilmemelidir.

Şekil 5.32 ve Şekil 5.44 arasında da değişen Th tabanlı yakıt ve değişen nanoakışkan oranlarına göre elde edilen sıcaklık ve DNBR değerleri gösterilmiştir. Şekil 5.33' de olduğu gibi nano parçacıklar % 0,2 hacim oranındayken, toryum tabanlı yakıt kullanıldığında, soğutucu akışkanda kanal sonunda kaynama başlamaktadır. Bu durumu gösteren boşluk oranı ve kalite grafikleri de Şekil 5.34-5.44b' de gösterilmiştir.

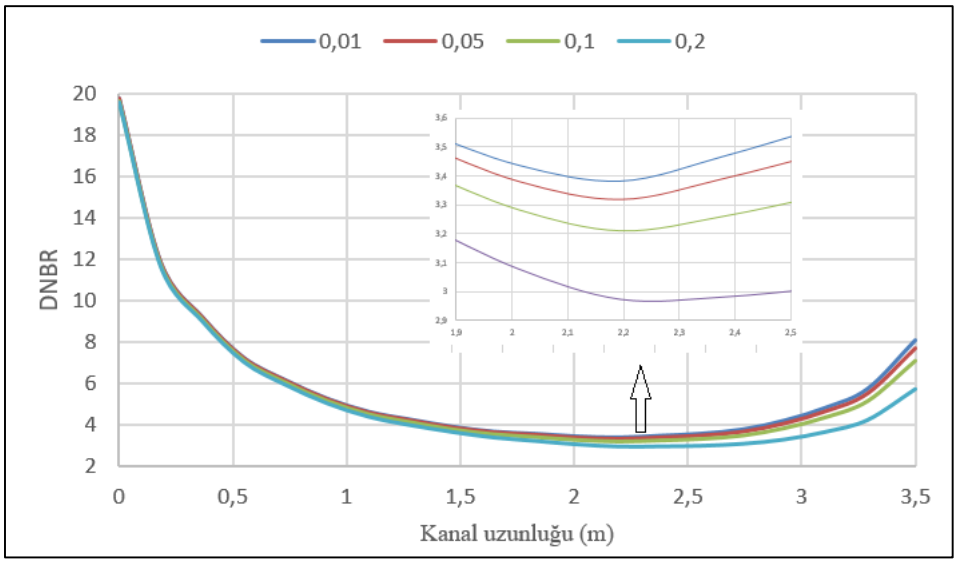


Şekil 5.34. % 5 ThO_2 yakıt ve % 0,01, % 0,05, % 0,1, % 0,2 oranlı CuO nanoparçacıklı soğutucu eklenmiş reaktörün sıcaklık değişimi, %0,2 oranında nanoparçacık eklenmiş soğutucunun kalite değişimi ve DNBR değişimi

Şekil 5.34' de % 5 ThO_2 yakıt ve % 0,01, % 0,05, % 0,1, % 0,2 oranlı CuO nanoparçacıklı soğutucu eklenmiş reaktörün sıcaklık ve DNBR değerlerinin değişimi gösterilmiştir. Buna göre, kanala giriş sıcaklığı 575 K olan soğutucu akışkan, kanal sonunda %0,01 nanoparçacık oranı için 614,17 K değerini almıştır. Artan nanoparçacık oranıyla beraber sıcaklık artmış ve %0,05 oranı için 615,46 ve %0,1 oranı için ise 617,23 K değerine ulaşmıştır. % 0,2 oranında nanoparçacık kullanımı durumunda ise, soğutucu sıcaklığı kanal boyunca artmış ve yaklaşık 3,5 metrelik kanal boyunca 2,95 metrede en sıcak değeri olan 618,49 K değerine ulaşmıştır. Yine Al_2O_3 de olduğu gibi bu durum kaynama olayının başladığını göstermiştir. Akış boyunca hep sıfır (0) olması beklenen kalite değeri, kanal sonunda 0,025 değerine ulaşmıştır.

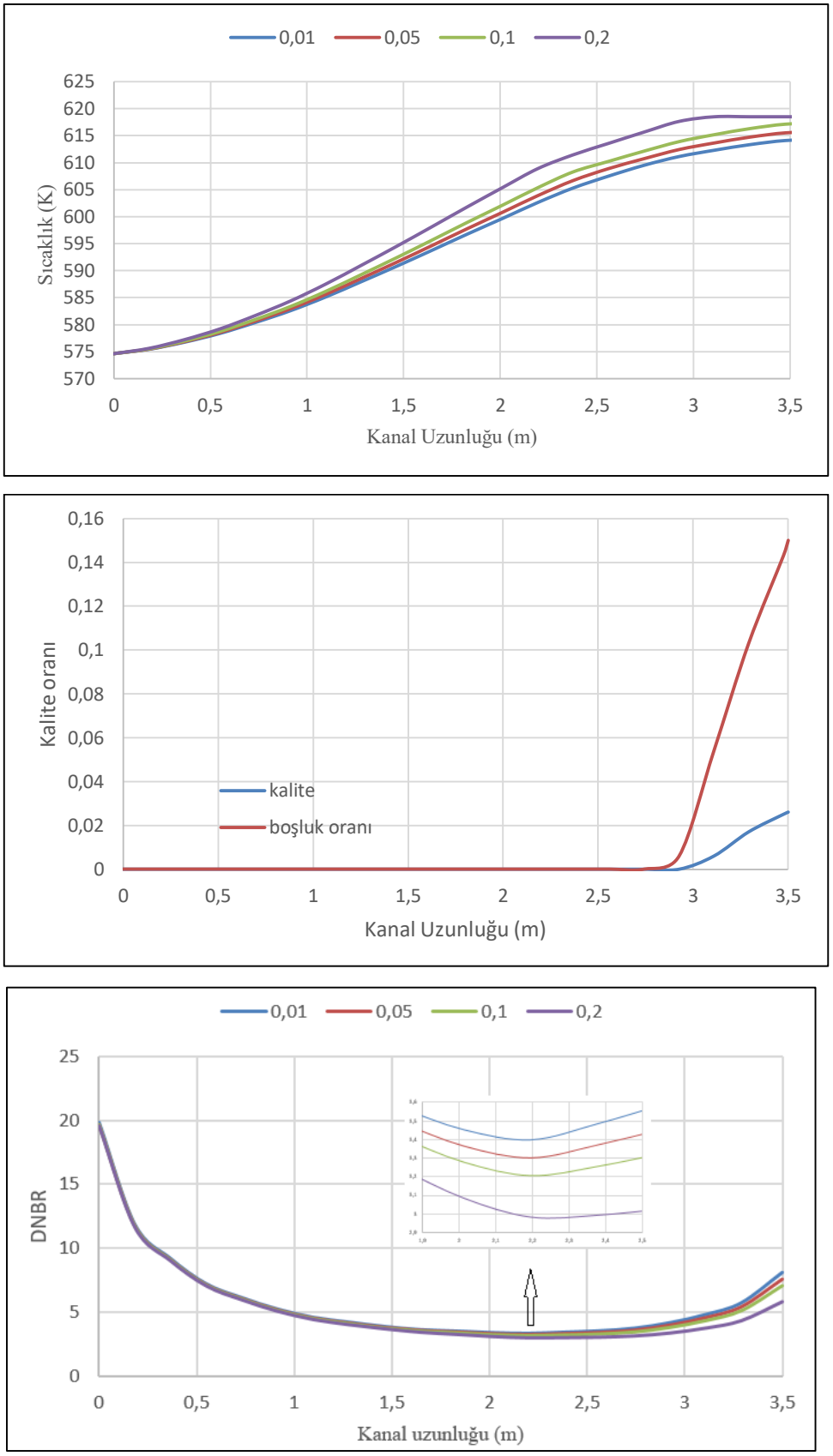


Şekil 5.35. % 5 ThO2 yakıt ve % 0,01, % 0,05, % 0,1, % 0,2 oranlı TiO2 nanoparçacıklı soğutucu eklenmiş reaktörün sıcaklık değişimi, % 0,2 oranında nanoparçacık eklenmiş soğutucunun kalite değişimi ve DNBR değişimi



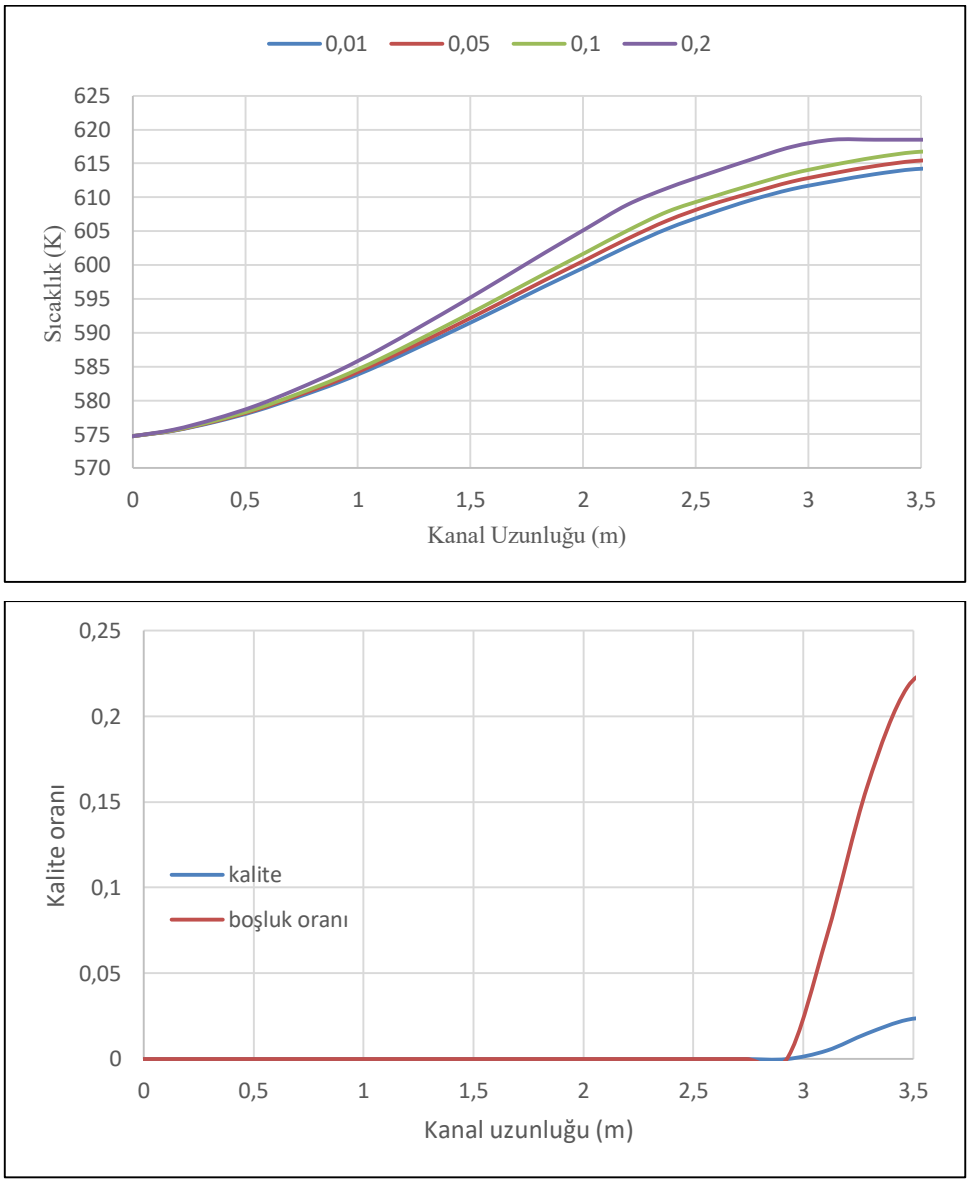
Şekil 5.35. (devam) % 5 ThO2 yakıt ve % 0,01, % 0,05, % 0,1, % 0,2 oranlı TiO2 nanoparçacıklı soğutucu eklenmiş reaktörün sıcaklık değişimi, % 0,2 oranında nanoparçacık eklenmiş soğutucunun kalite değişimi ve DNBR değişimi

Şekil 5.35'de % 5 ThO_2 yakıt ve % 0,01, % 0,05, % 0,1, % 0,2 oranlı TiO_2 nanoparçacıklı soğutucu eklenmiş reaktörün sıcaklık ve DNBR değerlerinin değişimi gösterilmiştir. Buna göre, kanala giriş sıcaklığı 575 K olan soğutucu akışkan, kanal sonunda %0,01 nanoparçacık oranı için 614,35 K değerini almıştır. Artan nanoparçacık oranıyla beraber sıcaklık artmış ve %0,05 oranı için 615,56 ve %0,1 oranı için ise 617,34 K değerine ulaşmıştır. % 0,2 oranında nanoparçacık kullanımı durumunda ise, soğutucu sıcaklığı kanal boyunca artmış ve en sıcak değeri olan 618,49 K değerine ulaşmıştır.

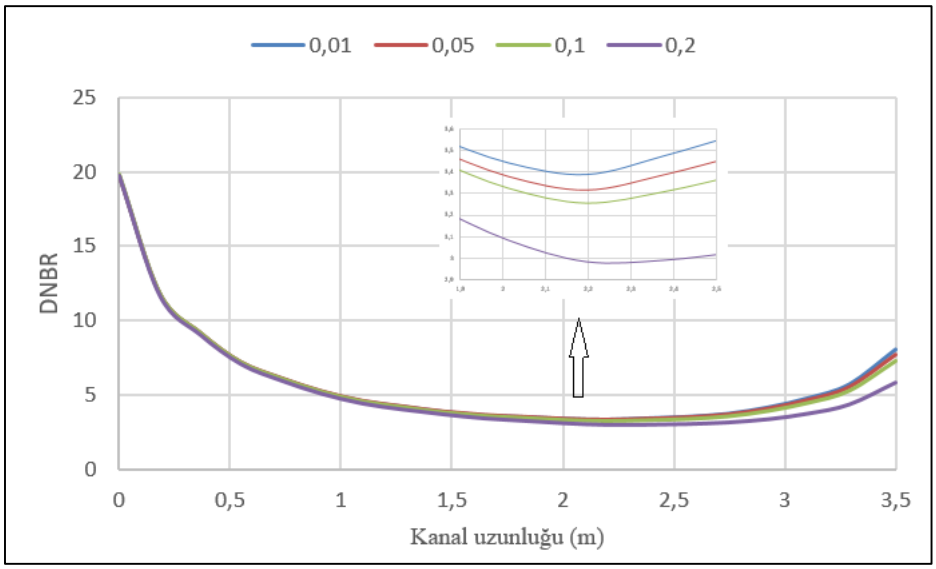


Şekil 5.36. % 10 ThO_2 yakıt ve % 0,01, % 0,05, % 0,1, % 0,2 oranlı Al_2O_3 nanoparçacıklı soğutucu eklenmiş reaktörün sıcaklık değişimi, % 0,2 oranında nanoparçacık eklenmiş soğutucunun kalite değişimi ve DNBR değişimi

Şekil 5.36' da % 10 ThO_2 yakıt ve % 0,01, % 0,05, % 0,1, % 0,2 oranlı Al_2O_3 nanoparçacıklı soğutucu eklenmiş reaktörde sıcaklık değerleri, % 0,01 oranı için 614,23 K ve %0,1 oranı için ise 617,16 K olarak bulunmuştur. DNBR değerleri ise en düşük % 0,01 oranı için 3,40 ve % 0,1 oranı için ise 3,205 olarak bulunmuştur. Diğer durumlarda olduğu gibi, % 0,2 nano parçacık eklenen toryum tabanlı yakıtta, yine kanal sonuna yakın noktadan başlamak üzere kaynama meydana gelmiştir.

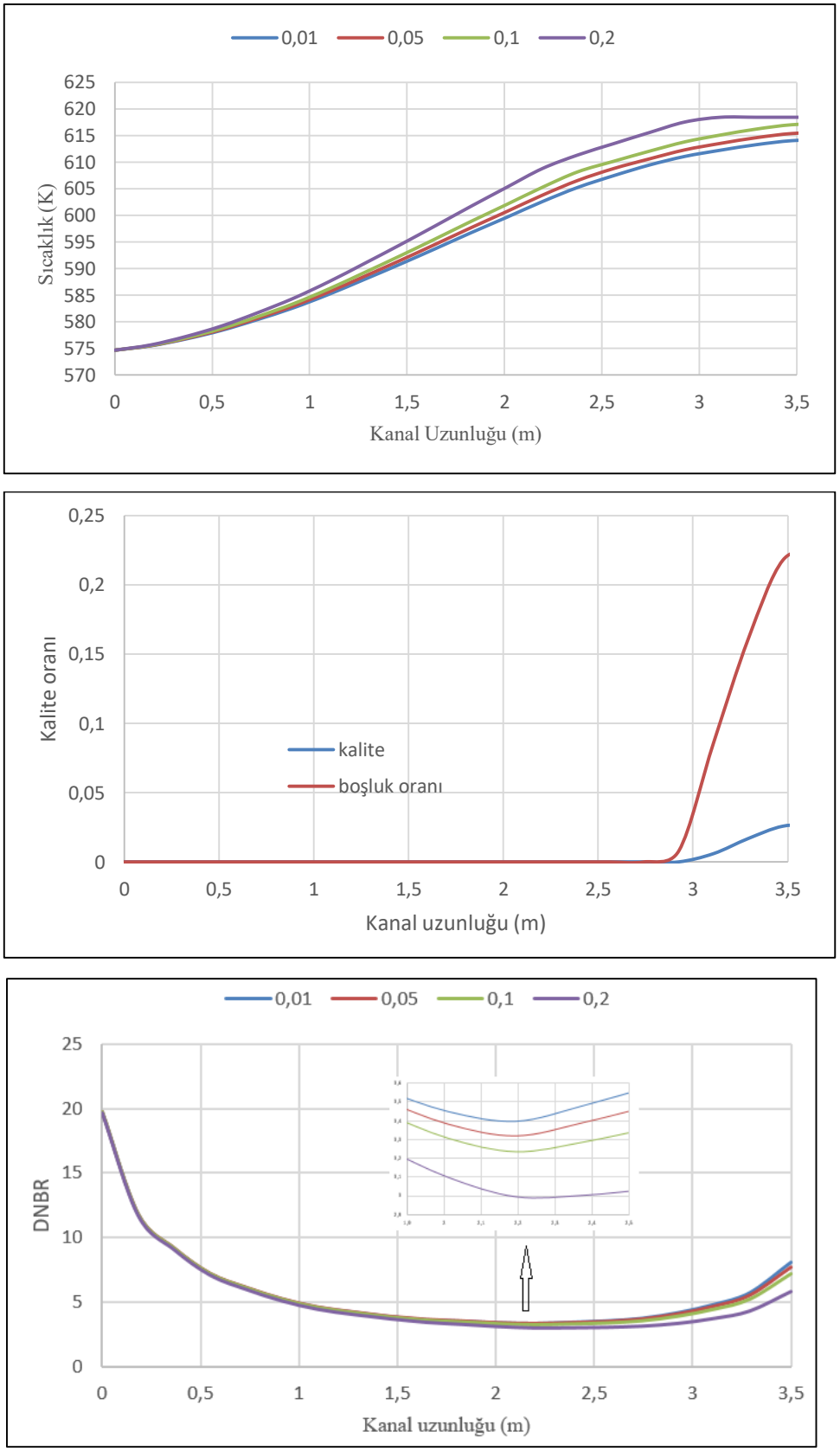


Şekil 5.37. % 10 ThO_2 yakıt ve % 0,01, % 0,05, % 0,1, % 0,2 oranlı CuO nanoparçacıklı soğutucu eklenmiş reaktörün sıcaklık değişimi, % 0,2 oranında nanoparçacık eklenmiş soğutucunun kalite değişimi ve DNBR değişimi



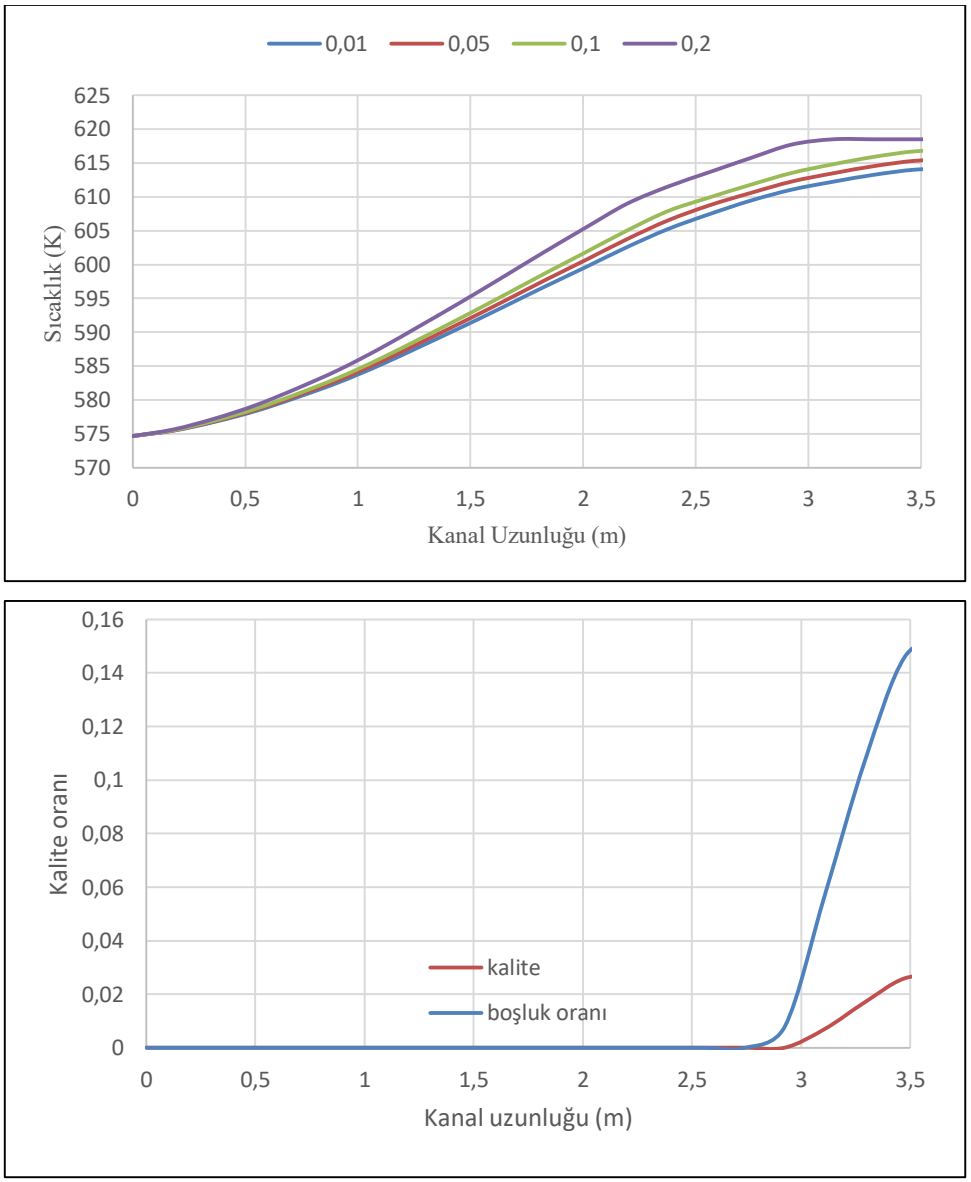
Şekil 5.37. (devam) % 10 ThO_2 yakıt ve % 0,01, % 0,05, % 0,1, % 0,2 oranlı CuO nanoparçacıklı soğutucu eklenmiş reaktörün sıcaklık değişimi, % 0,2 oranında nanoparçacık eklenmiş soğutucunun kalite değişimi ve DNBR değişimi

Şekil 5.37' de % 10 ThO_2 yakıt ve % 0,01, % 0,05, % 0,1, % 0,2 oranlı CuO nanoparçacıklı soğutucu eklenmiş reaktörde sıcaklık değerleri, % 0,01 oranı için 614,3 K ve %0,1 oranı için ise 616,88 K olarak bulunmuştur. DNBR değerleri ise en düşük % 0,01 oranı için 3,391 ve % 0,1 oranı için ise 3,256 olarak bulunmuştur.

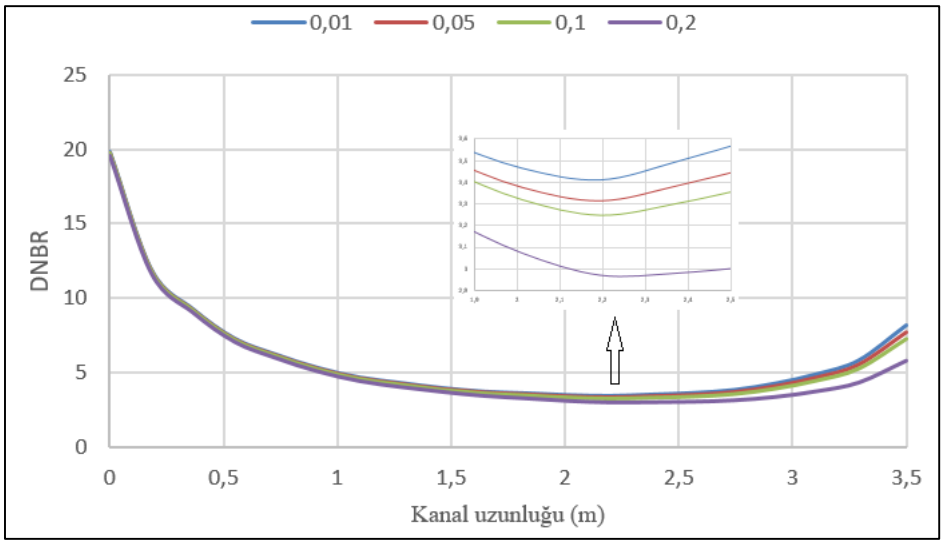


Şekil 5.38. % 10 ThO_2 yakıt ve % 0,01, % 0,05, % 0,1, % 0,2 oranlı TiO_2 nanoparçacıklı soğutucu eklenmiş reaktörün sıcaklık değişimi, % 0,2 oranında nanoparçacık eklenmiş soğutucunun kalite değişimi ve DNBR değişimi

Şekil 5.38' de % 10 ThO_2 yakıt ve % 0,01, % 0,05, % 0,1, % 0,2 oranlı TiO_2 nanoparçacıklı soğutucu eklenmiş reaktörde sıcaklık değerleri, % 0,01 oranı için 614,22 K ve % 0,1 oranı için ise 617,21 K olarak bulunmuştur. DNBR değerleri ise en düşük % 0,01 oranı için 3,394 ve % 0,1 oranı için ise 3,233 olarak bulunmuştur.

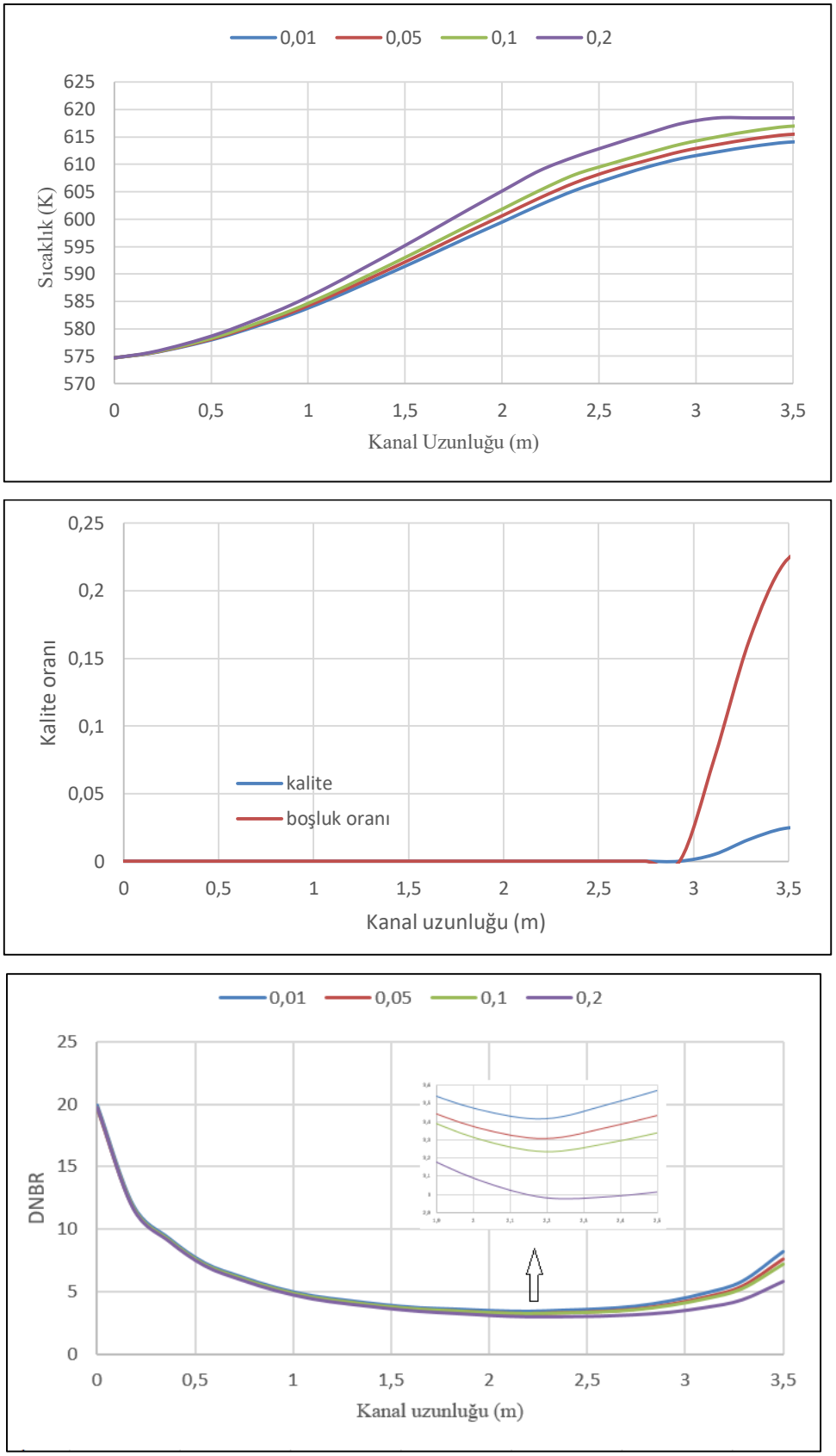


Şekil 5.39. % 15 ThO_2 yakıt ve % 0,01, % 0,05, % 0,1, % 0,2 oranlı Al_2O_3 nanoparçacıklı soğutucu eklenmiş reaktörün sıcaklık değişimi, % 0,2 oranında nanoparçacık eklenmiş soğutucunun kalite değişimi ve DNBR değişimi



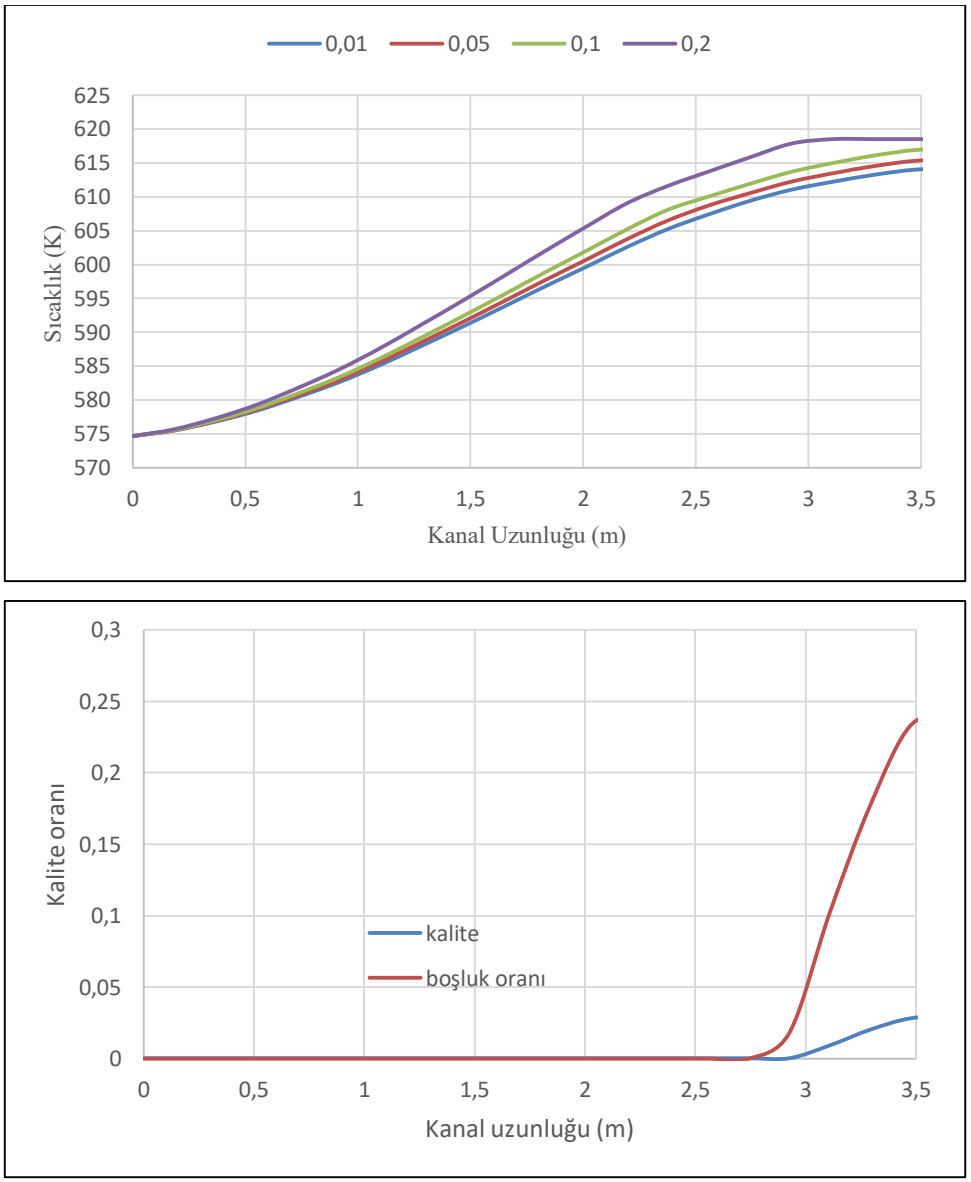
Şekil 5.39. (devam) % 15 ThO_2 yakıt ve % 0,01, % 0,05, % 0,1, % 0,2 oranlı Al_2O_3 nanoparçacıklı soğutucu eklenmiş reaktörün sıcaklık değişimi, % 0,2 oranında nanoparçacık eklenmiş soğutucunun kalite değişimi ve DNBR değişimi

Şekil 5.39' da % 15 ThO_2 yakıt ve % 0,01, % 0,05, % 0,1, % 0,2 oranlı Al_2O_3 nanoparçacıklı soğutucu eklenmiş reaktörde sıcaklık değerleri, % 0,01 oranı için 614,20 K ve %0,1 oranı için ise 616,98 K olarak bulunmuştur. DNBR değerleri ise en düşük % 0,01 oranı için 3,411 ve % 0,1 oranı için ise 3,248 olarak bulunmuştur. Ve yine % 0,2 oranında nanoparçacıklı soğutucu eklendiğinde, kaynama meydana gelmiştir.

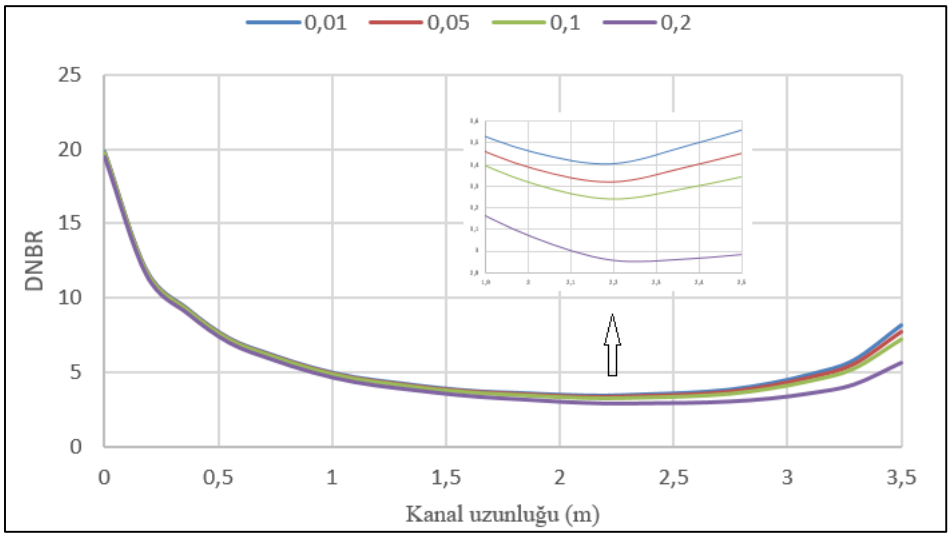


Şekil 5.40. % 15 ThO_2 yakıt ve % 0,01, % 0,05, % 0,1, % 0,2 oranlı CuO nanoparçacıklı soğutucu eklenmiş reaktörün sıcaklık değişimi, % 0,2 oranında nanoparçacık eklenmiş soğutucunun kalite değişimi ve DNBR değişimi

Şekil 5.40' da % 15 ThO_2 yakıt ve % 0,01, % 0,05, % 0,1, % 0,2 oranlı CuO nanoparçacıklı soğutucu eklenmiş reaktörde sıcaklık değerleri, % 0,01 oranı için 614,16 K ve %0,1 oranı için ise 617,11 K olarak bulunmuştur. DNBR değerleri ise en düşük % 0,01 oranı için 3,415 ve % 0,1 oranı için ise 3,237 olarak bulunmuştur.

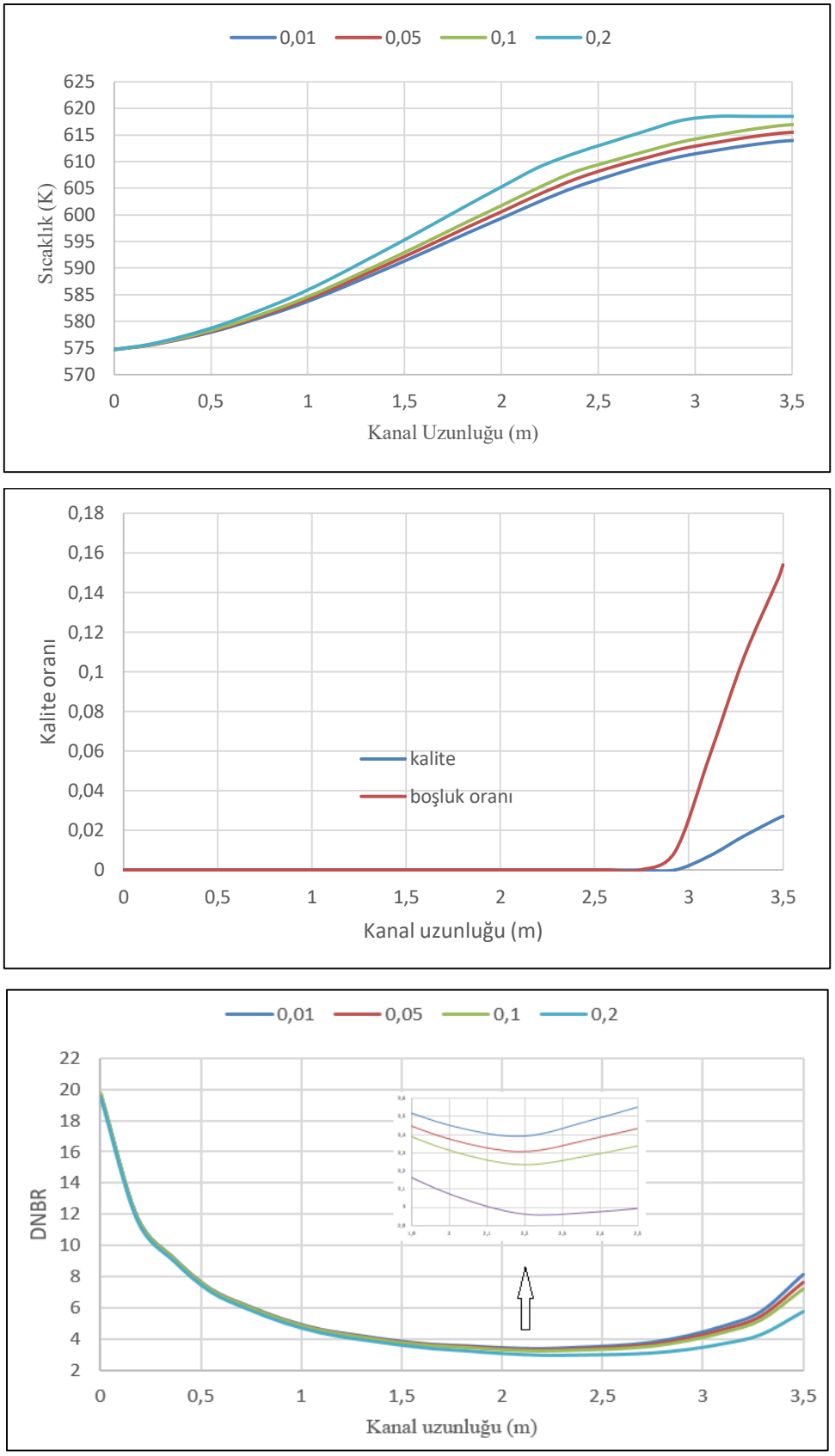


Şekil 5.41. % 15 ThO_2 yakıt ve % 0,01, % 0,05, % 0,1, % 0,2 oranlı TiO_2 nanoparçacıklı soğutucu eklenmiş reaktörün sıcaklık değişimi, % 0,2 oranında nanoparçacık eklenmiş soğutucunun kalite değişimi ve DNBR değişimi



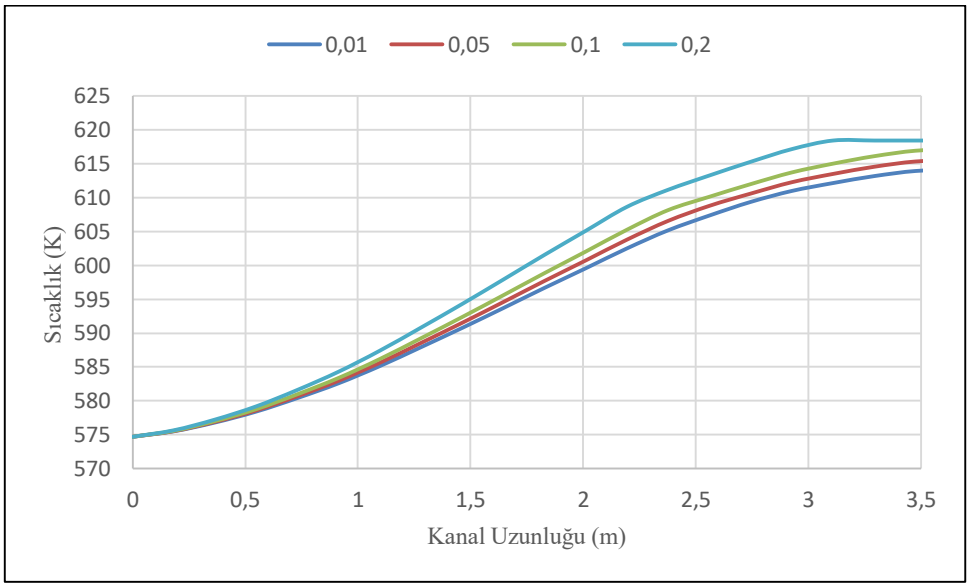
Şekil 5.41. (devam) % 15 ThO_2 yakıt ve % 0,01, % 0,05, % 0,1, % 0,2 oranlı TiO_2 nanoparçacıklı soğutucu eklenmiş reaktörün sıcaklık değişimi, % 0,2 oranında nanoparçacık eklenmiş soğutucunun kalite değişimi ve DNBR değişimi

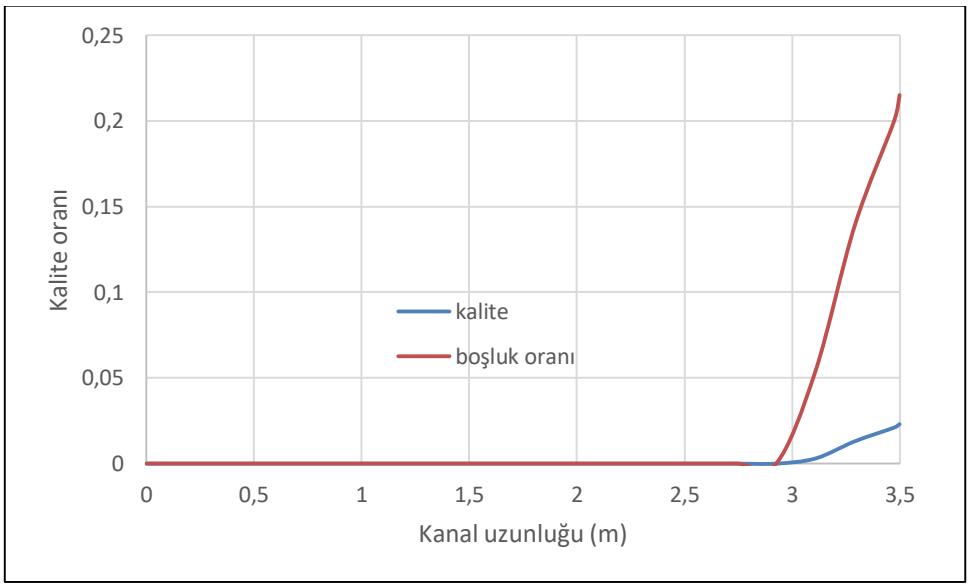
Şekil 5.41' de % 15 ThO_2 yakıt ve % 0,01, % 0,05, % 0,1, % 0,2 oranlı TiO_2 nanoparçacıklı soğutucu eklenmiş reaktörde sıcaklık değerleri, % 0,01 oranı için 614,23 K ve %0,1 oranı için ise 617,12 K olarak bulunmuştur. DNBR değerleri ise en düşük % 0,01 oranı için 3,403 ve % 0,1 oranı için ise 3,241 olarak bulunmuştur.



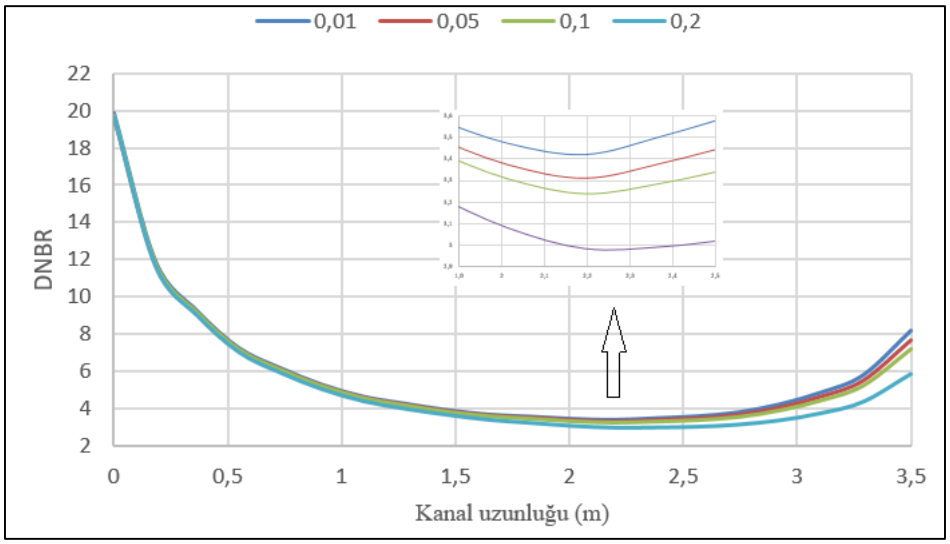
Şekil 5.42. % 20 ThO_2 yakıt ve % 0,01, % 0,05, % 0,1, % 0,2 oranlı Al_2O_3 nanoparçacıklı soğutucu eklenmiş reaktörün sıcaklık değişimi, % 0,2 oranında nanoparçacık eklenmiş soğutucunun kalite değişimi ve DNBR değişimi

Şekil 5.42' de % 20 ThO_2 yakıt ve % 0,01, % 0,05, % 0,1, % 0,2 oranlı Al_2O_3 nanoparçacıklı soğutucu eklenmiş reaktörde sıcaklık değerleri, % 0,01 oranı için 614,11 K ve % 0,1 oranı için ise 617,10 K olarak bulunmuştur. DNBR değerleri ise en düşük % 0,01 oranı için 3,393 ve % 0,1 oranı için ise 3,235 olarak bulunmuştur. Ve bu ThO_2 oranında da % 0,2 oranında nanoparçacıklı soğutucu eklendiğinde, kaynama meydana gelmiştir.



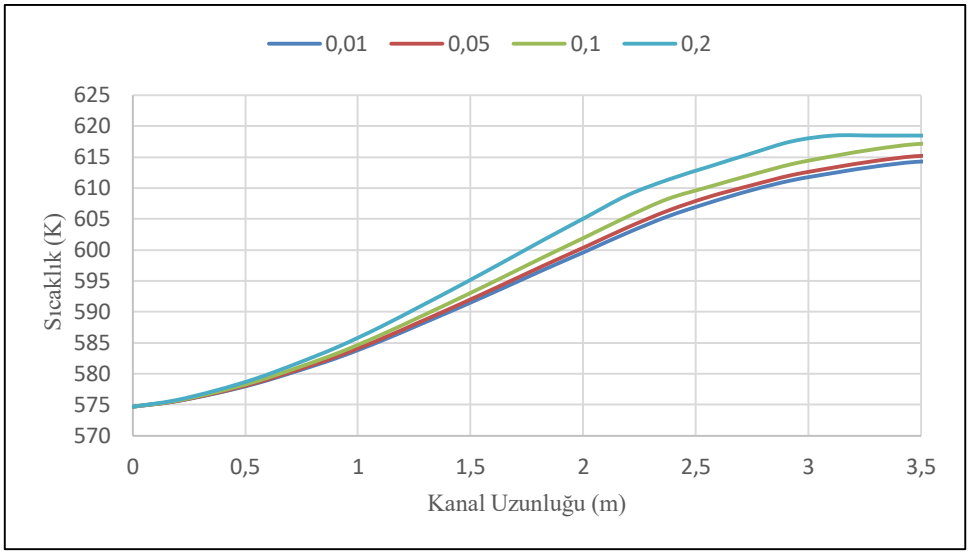


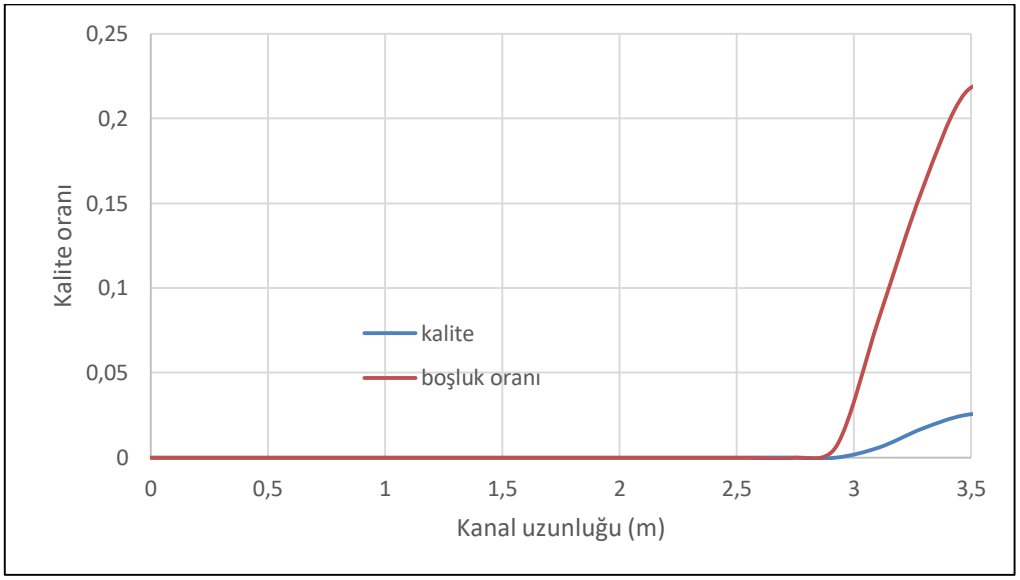
Şekil 5.43. % 20 ThO_2 yakıt ve % 0,01, % 0,05, % 0,1, % 0,2 oranlı CuO nanoparçacıklı soğutucu eklenmiş reaktörün sıcaklık değişimi, % 0,2 oranında nanoparçacık eklenmiş soğutucunun kalite değişimi ve DNBR değişimi

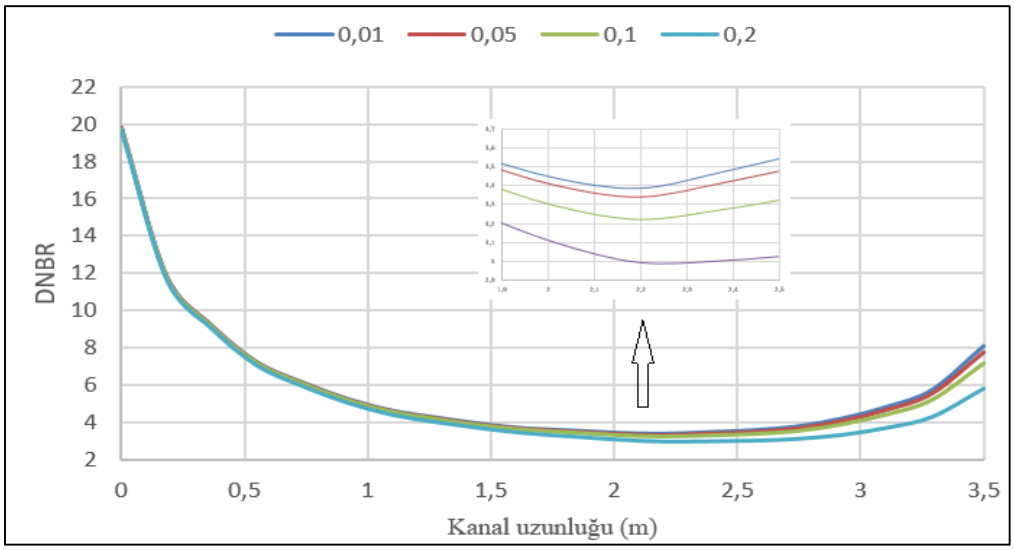


Şekil 5.43. (devam) % 20 ThO_2 yakıt ve % 0,01, % 0,05, % 0,1, % 0,2 oranlı CuO nanoparçacıklı soğutucu eklenmiş reaktörün sıcaklık değişimi, % 0,2 oranında nanoparçacık eklenmiş soğutucunun kalite değişimi ve DNBR değişimi

Şekil 5.43' de % 20 ThO_2 yakıt ve % 0,01, % 0,05, % 0,1, % 0,2 oranlı CuO nanoparçacıklı soğutucu eklenmiş reaktörde sıcaklık değerleri, % 0,01 oranı için 614,10 K ve %0,1 oranı için ise 617,13 K olarak bulunmuştur. DNBR değerleri ise en düşük % 0,01 oranı için 3,418 ve % 0,1 oranı için ise 3,236 olarak bulunmuştur.







Şekil 5.44. % 20 ThO_2 yakıt ve % 0,01, % 0,05, % 0,1, % 0,2 oranlı TiO_2 nanoparçacıklı soğutucu eklenmiş reaktörün sıcaklık değişimi, % 0,2 oranında nanoparçacık eklenmiş soğutucunun kalite değişimi ve DNBR değişimi

Şekil 5.44' de % 20 ThO_2 yakıt ve % 0,01, % 0,05, % 0,1, % 0,2 oranlı TiO_2 nanoparçacıklı soğutucu eklenmiş reaktörde sıcaklık değerleri, % 0,01 oranı için 614,35 K ve %0,1 oranı için ise 617,27 K olarak bulunmuştur. DNBR değerleri ise en düşük % 0,01 oranı için 3,387 ve % 0,1 oranı için ise 3,223 olarak bulunmuştur.

Şekil 32-44' de değişen ThO_2 yakıt oranı ve Al_2O_3, CuO ve TiO_2 için en sıcak kanalda gerçekleşen soğutucu akışkan sıcaklık değişimi gösterilmiştir. Elde edilen bütün sıcaklık değerleri yakıtta ThO_2 kullanmanın reaktör güvenliği için tehlike oluşturmadığını göstermiştir. Ayrıca eğer toryum rezervi reaktör yakınlarında ise, reaktörde üretken (fertile) malzeme olarak ^{238}U yerine ^{232}Th kullanımının ekomonik açıdan da katkısı olacaktır.

Çizelge 5.1. Toryum tabanlı yakıt ve nanoparçacıklı soğutucu kullanımının, kanal boyunca aldığı en yüksek sıcaklık ve en düşük DNBR değerleri

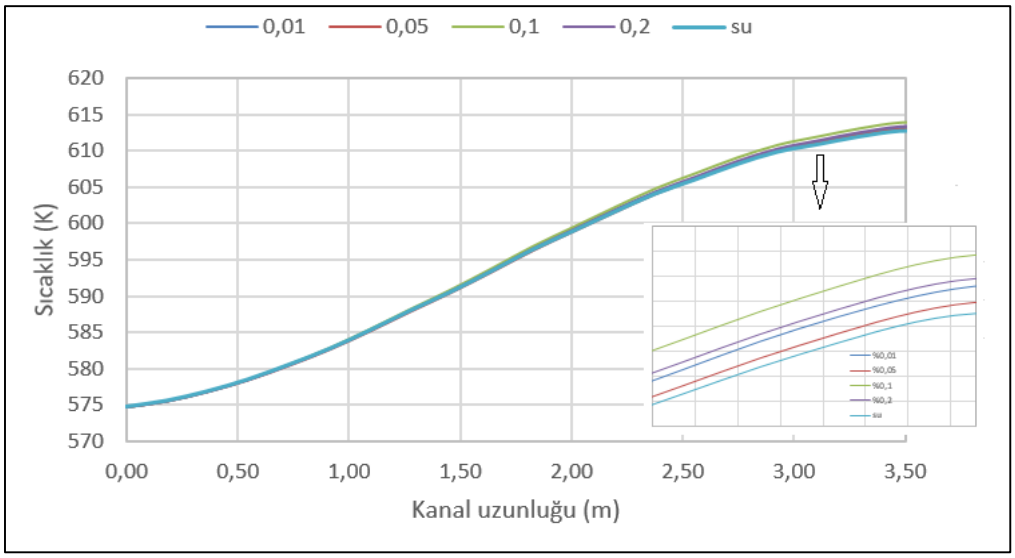
%5 ThO_2								
	Al_2O_3		*CuO*		*TiO_2*		*Su soğutuculu*	
Nano parçacık oranı	Sıcaklık	DNBR	Sıcaklık	DNBR	Sıcaklık	DNBR	Sıcaklık	DNBR
%0, 01	614,45	3,298	614,17	3,411	614,35	3,384	613,92	3,425
%0,05	615,55	3,202	615,46	3,325	615,56	3,320		
%0,1	617,35	2,974	617,23	3,218	617,34	3,210		
%10 ThO_2								
	Al_2O_3		*CuO*		*TiO_2*		*Su soğutuculu*	
Nano parçacık oranı	Sıcaklık	DNBR	Sıcaklık	DNBR	Sıcaklık	DNBR	Sıcaklık	DNBR
%0, 01	614,23	3,40	614,30	3,39	614,22	3,39	613,64	3,450
%0,05	615,70	3,30	615,53	3,31	615,56	3,31		
%0,1	617,16	3,20	616,88	3,25	617,21	3,23		
%15 ThO_2								
	Al_2O_3		*CuO*		*TiO_2*		*Su soğutuculu*	
Nano parçacık oranı	Sıcaklık	DNBR	Sıcaklık	DNBR	Sıcaklık	DNBR	Sıcaklık	DNBR
%0, 01	614,20	3,411	614,16	3,415	614,23	3,403	613,45	3,484
%0,05	615,56	3,317	615,56	3,307	615,48	3,317		
%0,1	616,98	3,248	617,11	3,237	617,12	3,241		
%20 ThO_2								
	Al_2O_3		*CuO*		*TiO_2*		*Su soğutuculu*	
Nano parçacık oranı	Sıcaklık	DNBR	Sıcaklık	DNBR	Sıcaklık	DNBR	Sıcaklık	DNBR
%0, 01	614,11	3,393	614,10	3,418	614,35	3,387	613,73	3,481
%0,05	615,66	3,305	615,53	3,312	615,37	3,340		
%0,1	617,10	3,235	617,13	3,236	617,27	3,223		

Şekil 32-44 a grafiklerinde sıcaklık değerleri birbirine oldukça yakındır. Her üç nano parçacık türü için de en yüksek soğutucu akışkan sıcaklığına % 0,1 değerinde ulaşılmıştır. Aslında % 0,2 hacimli nanoparçacık kullanımında ulaşılan değer daha yüksek olsada , bu oranda sistemde kaynama başladığı için güvenlik zaafiyetine yol açabileceği öngörülerek, bu oran tavsiye edilmemektedir. % 0,2 hacim oranında nanoparçacık kullanımında kaynamanın başlamasınn nedeni, nanoakışkan yoğunluğunun Eş. 4.1' e göre hesaplanmasından sonra, diğer nanoparçacık oranlarına göre çok daha fazla düşmesidir. Diğer oranlara göre daha az olan yoğunluk değeri, sıcaklığın da diğer oranlara göre daha fazla olmasına sebep olmuştur. Artan sıcaklık değeri de sistemde kaynamanın başlamasını sağlamıştır.

Ayrıca Çizelge 5.1'de toryum tabanlı yakıt ve nanoparçacıklı soğutucu kullanımının, kanal boyunca aldığı en yüksek sıcaklık ve en düşük DNBR değerleri ile nanoparçacık olmaksızın kullanılan soğutucu akışkanın sıcaklık ve DNBR değerleri gösterilmiştir. Bu değerlere göre nanoakışkan kullanımı, soğutucu sıcaklığını arttırmıştır.

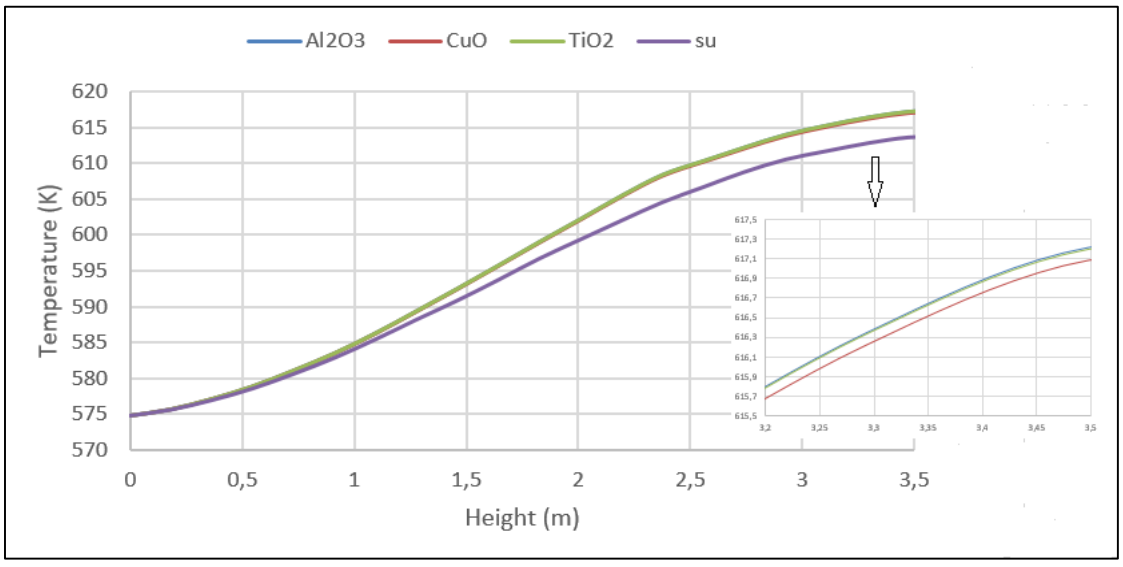
%5 ThO_2 yakıt ve % 0,1 hacim oranlı Al_2O_3 'in nanoparçacık olarak kullanıldığı durumda, soğutucu sıcaklığı, nanoparçacık kullanılmayan duruma göre 3,43 derece artmıştır. Bu sıcaklık değişimi küçük görünse de, soğutucunun başlangıç sıcaklığı 575 K olduğu ve kanal sonu sıcaklıkları 617,35 K ve 613,92 K olduğundan, sadece su kullanılan soğutucuya göre nanoparçacık kullanımında sıcaklık % 0,6 oranında artmıştır.

% 0,1 hacim oranında kullanılan nano parçacıklar en sıcak değerini %5 ThO_2 kullanıldığında almışlardır. %5 ThO_2 yakıt ve % 0,1 hacim oranlı Al_2O_3, CuO ve TiO_2 nanoparçacıklı soğutucunun sıcaklık değişiminin, karşılaştırmalı hali Şekil 5.39 'da verilmiştir. Daha önce de belirtildiği gibi her ne kadar sıcaklık değerleri birbirine çok yakın olsada, en yüksek sıcaklık değeri %5 ThO_2 yakıt ve % 0,1 hacim oranlı Al_2O_3 'in nanoparçacık olarak kullanıldığı nanoakışkanda elde edilmiştir.



Şekil 5.45. UO_2 yakıt % 0,01, % 0,05, % 0,1, % 0,2 oranlı Al_2O_3, nanoparçacıklı soğutucu eklenmiş ve sadece su içeren soğutucunun sıcaklık değişimi

Şekil 5.45 'de ThO_2 yakıt eklenmeden sadece UO_2 yakıt içeren ve % 0,01, % 0,05, % 0,1, % 0,2 oranlı Al_2O_3, nanoparçacıklı soğutucu eklenmiş ve sadece su içeren soğutucunun sıcaklık değişimi gösterilmiştir. Buna göre sadece UO_2 yakıtlı ve su soğutuculu reaktörde soğutucu sıcaklığı kanal sonunda 612,68 K olarak belirlenmişken, en sıcak akış % 0,1 Al_2O_3 eklenmesiyle 613,94 K olarak bulunmuştur. Yani ThO_2 yakıt olmadığında da, soğutucu en yüksek sıcaklığa % 0,1 oranında Al_2O_3 eklendiği durumda ulaşmıştır.

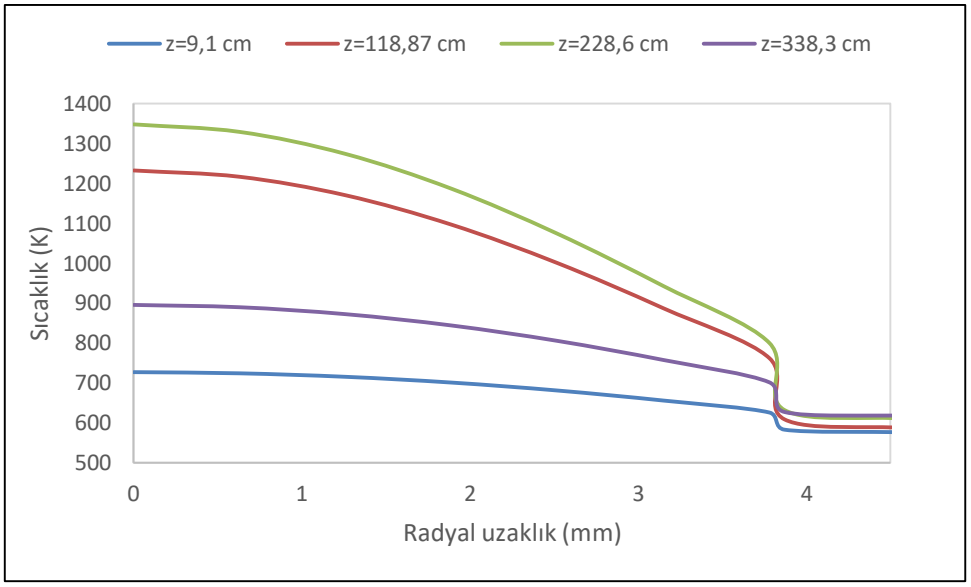


Şekil 5.46. % 5 ThO_2 yakıt ve % 0,1 hacim oranlı Al_2O_3, CuO ve TiO_2 nanoparçacık eklenmiş ve sadece su içeren soğutucunun sıcaklık değişiminin karşılaştırılması

Şekil 5.32 –Şekil 5.44 c' de gösterilen DNBR değişimine göre reaktör güvenlik sınırları içinde kalmıştır. Önemli bir güvenlik faktörü olarak DNBR, reaktörün tam güç çalışması sırasında hesaplanır. Nükleer santral güvenliğinde önemli bir parametredir ve ısı akısını film kaynama bölgesine girmemesi için sınırlar (Mousavizadeh et al., 2015). Nominal çalışma koşullarında beklenen minimum DNBR değeri 2,08'dir (Westinghouse). Reaktördeki yakıtın maksimum sıcaklık değeri, reaktörün güç seviyesine, soğutma sistemi tasarımına ve yakıt özelliklerine bağlıdır. Metalurjik kısıtlamalar, yakıt çubuğunun sahip olabileceği sıcaklığı sınırlar. Bu sıcaklığın üzerinde yakıt erimesi, zarf malzemesinin parçalanması ve sonunda fisyon ürünlerinin açığa çıkma ihtimali vardır. Reaktör soğutucu sistemi tasarımında en önemli kriter, istenilen güç seviyesinde üretilen ısı sistemden alınırken, maksimum yakıt sıcaklığının önceden belirlenmiş bu sınırın altında kalmasıdır.

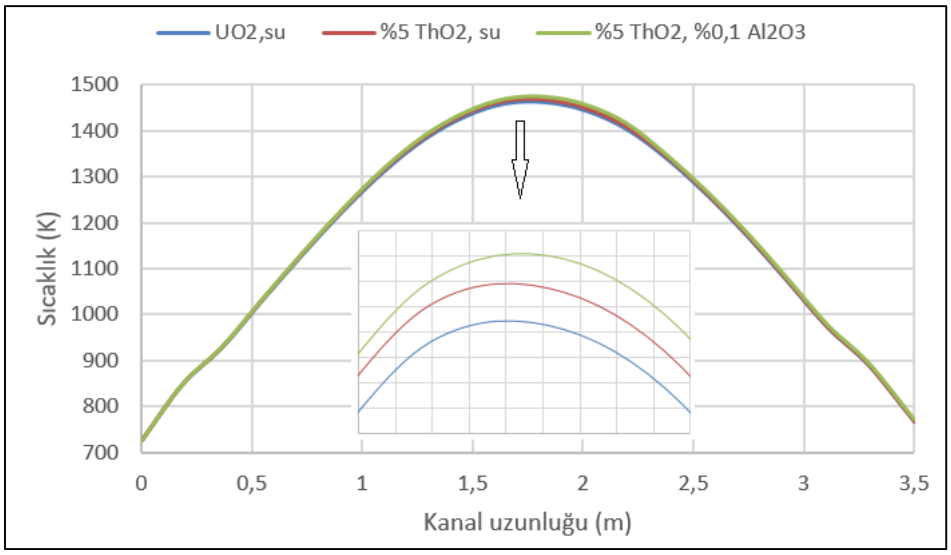
Her üç nano parçacık için de nano akışkanın artan oranda kullanımı DNBR değerini, 2,08 değerinin altına düşürmeden soğutucu sıcaklığını arttırmıştır. Ref. (Saadati et al., 2018) de araştırmacılar DNBR değeri için benzer sonuçlara ulaşmışlardır. Sıcaklık değerleri 575 K ile başlayarak, değişen nano parçacık hacim oranlarına göre 613 ile 618 K arasında değişmiştir. Zarifi ve ark. nın (Zarifi et al., 2013) yaptığı çalışmada, Al_2O_3 nano parçacığının değişen hacim oranlarına göre termal incelemeler yapılmış ve benzer sonuçlar elde edilmiştir.

Grafikler incelendiğinde, en yüksek soğutucu sıcaklığı değerine %5 ThO_2 yakıt ve % 0,1 oranında Al_2O_3 nano parçacığı kullanıldığı zaman yaklaşık 617,5 K olarak elde edilmiştir (Şekil 5.46). Bu oranda kullanılan nanoparçacık değerinde, DBNR oranı da en düşük 3,202 değerine düşmüştür. Bu en verimli kombinasyonun, radyal yönde yakıt sıcaklığı incelenmiş ve Şekil 5.47 'de gösterilmiştir.



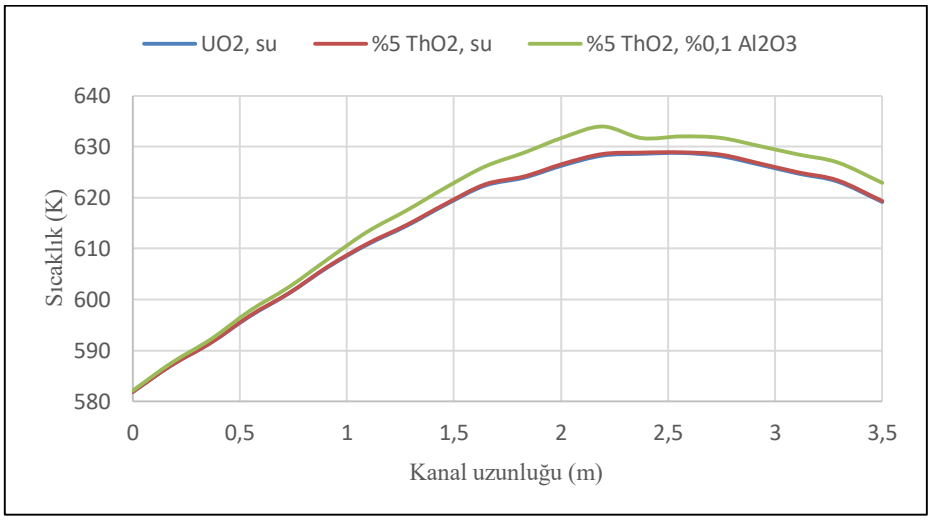
Şekil 5.47. % 5 ThO_2 yakıt ve % 0,1 oranlı Al_2O_3 nanoparçacıklı soğutucu eklenmiş reaktörün radyal yönde sıcaklık değişimi

Şekil 5.47 ' de en sıcak kanalda ki yakıt çubuğunda, radyal yöndeki sıcaklık değişiminin yakıt çubuğunun merkezinden başlayarak soğutucuya kadar olan değişimi gösterilmiştir. Yakıt merkezinde soğutucu sıcaklığı radyal yönde en sıcak değerinde iken, zarfa yaklaştıkça azalmakta ve soğutucu da radyal yönde aldığı en düşük değere ulaşmaktadır. Ref. (Faghihi et al., 2016) ' de yapılan çalışmada da radyal yönde gerçekleşen sıcaklık değişiminin benzer bir eğim izlediği görülmüştür.



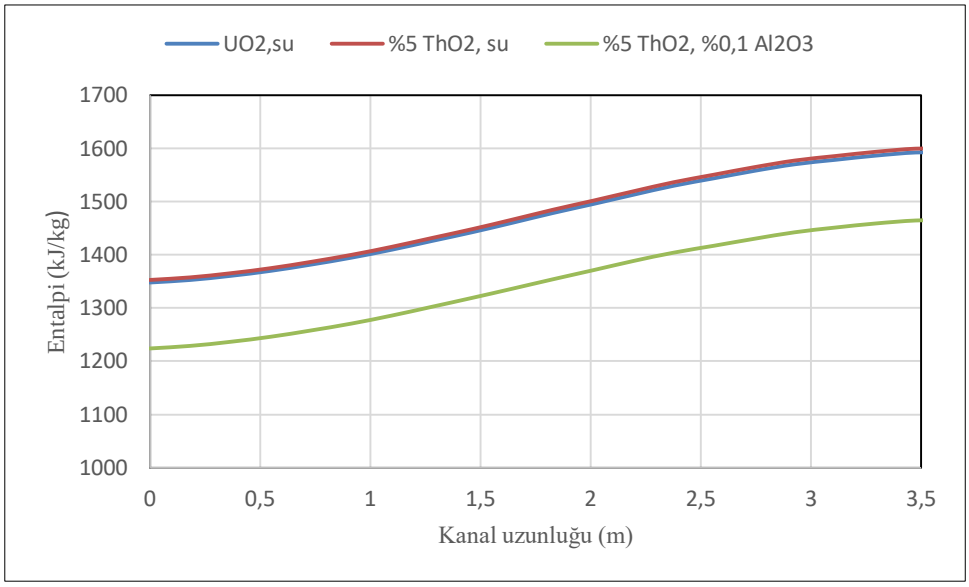
Şekil 5.48. UO_2 yakıt ve su soğutucu, % 5 ThO_2 yakıt ve su soğutucu ve de %5 ThO_2 yakıt ile % 0,1 oranlı Al_2O_3 nanoparçacıklı soğutucu eklenmiş reaktörün yakıt sıcaklığı değişimi

Şekil 5.48 ’de en sıcak kanalda bulunan yakıt çubuğunda kanal boyunca gerçekleşen yakıt sıcaklık değişimi gösterilmiştir. Yakıt sıcaklığının maksimum 1474 K olması, nanoakışkan kullanılan soğutuculu sistem için, daha önce yapılan (UO_2 yakıtlı) çalışmalarla uyumludur (Ghazanfari et al., 2016b). Ayrıca sadece su kullanılan soğutucuya ve UO_2 yakıtına göre sıcaklık 1460 K ve %5 ThO_2 yakıt ile su soğutucu kullanımında ise sıcaklık 1467,8 K olarak belirlenmiştir.



Şekil 5.49. UO_2 yakıt ve su soğutucu, % 5 ThO_2 yakıt ve su soğutucu ve de %5 ThO_2 yakıt ile % 0,1 oranlı Al_2O_3 nanoparçacıklı soğutucu eklenmiş reaktörün zarf (clad) sıcaklığı değişimi

Şekil 5.49 ’da yakıt zarfında gerçekleşen sıcaklık değişimi gösterilmiştir. Zarf sıcaklığı, referans çalışmalar ile (Ghazanfari et al., 2016b) - (Faghihi et al., 2016) benzer eğilim göstermiştir. Zarf sıcaklığının referans değerleri altında kalması oldukça önemlidir. Çünkü bir reaktörün normal işletmesi sırasında, zarf imalatı ne kadar özenli olsa da ,birkaç yakıt elemanının zarfında kaçak meydana gelmesi ve az da olsa çevreye radyoaktivite kaçmasına yol açabilir. Zarfın herhangi bir bölümü erime sıcaklığına ulaştığı takdirde zarfın iç bölgesinde biriken tüm fisyon ürünü gazlar soğutucuya kaçabilir (Lamarsh & Baratta, 2016).



Şekil 5.50. UO_2 yakıt ve su soğutucu, % 5 ThO_2 yakıt ve su soğutucu ve de %5 ThO_2 yakıt ile % 0,1 oranlı Al_2O_3 nanoparçacıklı soğutucu eklenmiş reaktörün entalpi değişimi

Şekil 5.50 'de en sıcak kanalda ki entalpi değişimi gösterilmiştir. Birim kütle başına toplam enerjinin sürekli artması beklenen bir sonuçtur. Yakıt çubuğu boyunca yukarı doğru ısınarak ilerleyen soğutucu akışkan, fisyon sonucu üretilen ısıyı çekmeye başladıkça enerjisi de artacaktır. Sadece su içeren ve yakıt olarak UO_2 kullanan bir reaktörde entalpi değeri kanal sonunda neredeyse 1600 kJ/kg değerine ulaşmışken, %5 ThO_2 ve %0,1 Al_2O_3 nanoparçacık içeren kombinasyonda, entalpi değeri kanal sonunda 1465 kJ/kg çıkmıştır. Yani nanoparçacık ve ThO_2 yakıt içeren durumda, sistemin entalpisi azalmıştır. Soğutucunun entalpisindeki değişim daha önce yapılan, yakıt olarak UO_2 kullanan çalışmalarla uyum içindedir (Safaei Arshi et al., 2010).

6. SONUÇ

Bu tez kapsamında, VVER-1000 tipi Rus yapımı basınçlı su reaktörünün nötronik ve özellikle termal hidrolik analizi yapılmıştır. Türkiye'de kurulacak olan ilk nükleer reaktör olarak "Türkiye Cumhuriyeti Hükümeti ile Rusya Federasyonu Hükümeti Arasında Türkiye Cumhuriyetinde Akkuyu Sahasında Bir Nükleer Güç Santralinin Tesisine ve İşletimine Dair İşbirliğine İlişkin Anlaşma" kapsamında VVER 1200 nükleer reaktörü kurulması planlanmaktadır. Bu sebeple VVER 1200 nükleer reaktörüne tasarımsal olarak benzer özellik gösteren VVER 1000 reaktör tipi analizi yapmak, sonradan yapılacak çalışmalar için referans olması amacıyla yapılmıştır.

Bu tez çalışmasından elde edilen sonuçların değerlendirmesi ve bu sonuçlar kapsamında yapılan öneriler aşağıda maddelenmiştir;

- Bu tez kapsamında VVER 1000 nükleer reaktörünün nötronik hesaplamaları MCNP kodu yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Yapılan hesaplamalarda % 3,7 zenginlikte UO_2 yakıtına, değişen oranlarda ThO_2 eklenerek ve de yine değişen tür ve oranlarda nanoparçacık eklenerek, bağıl güç yoğunluğu değerleri ve kritiklik değerleri elde edilmiştir. Bir reaktörün sabit rejimde çalışması için kritiklik değeri olan k'nın sürekli 1'e eşit olması istenir ama k değeri genelde başlangıçta yüksekken, reaktörün çalışması boyunca azalır. Çünkü sistemde fisyon yaparak enerji üretecek nötron sayısı da zamanla azalır.
- Yapılan hesaplamalar sonucunda, keff değeri % 5 ThO_2 içeren yakıt ve % 0,01 Al_2O_3 içeren nanoakışkan için, diğer yakıt-soğutucu kombinasyonlarına nazaran daha yüksek bir değer olan 1,34 ile başlamış ve artan nano akışkan oranı sonucu 1,28'e düşmüştür. Yakıtta ki toryum miktarını arttırarak % 20 yaptığımız zaman ise, keff değeri yine Al_2O_3 için, 1,25 değerini almış ve artan nanoparçacık oranıyla 1,18 değerine düşmüştür. Yani %20 oranında ThO_2 kullanıldığında, kritikliğin başlangıç değeri %5 ThO_2 yakıtına göre yaklaşık %7 oranında azalmıştır. CuO ve TiO_2 nanoparçacıkları için de benzer durum söz konusu olmuştur yani daha yüksek oranda nanoparçacık kullanıldığında, keff değeri daha yüksek bir değer almıştır. Bu da nanoparçacık kullanımının reaktör verimini arttıracağının bir göstergesidir. Diğer yandan, artan ThO_2 oranıyla, keff değerinin azaldığı görülmüştür. Bu da toryumun yakıt olarak uranyum yerine kullanılmasının reaktörde ortaya çıkan fisyon enerjisini azaltacağı sonucunu doğurur. Ancak yine de ^{238}U yerine ^{232}Th kullanımı, kritiklik

değerini kritik değer olan 1'in çok üstünde çıkarmadığı veya altında düşürmediği için, alternatif yakıt olarak kullanılabileceğini ortaya koymuştur.

- MCNP kodundan aynı zamanda bağıl güç yoğunluğu değerleri elde edilmiştir. Her bir yakıt çubuğunun toplam güce katkısıyla ilgili olan bu değerler, değişen yakıt ve soğutucu özelliklerine göre değişiklik göstermiştir. Bağıl güç yoğunluğu değerleriyle ilgili olarak , yakıt veya soğutucu değişimiyle doğru veya ters orantılı olduğuna dair bir çıkarımda bulunmak zordur. Çünkü bağıl güç yoğunluğu değerleri direkt fisyon olayıyla ilgilidir. Fisyon olayı ise olasılıksal bir olaydır. Ancak bağıl güç yoğunluğu değerleri, COBRA IV kodu girdisinde kullanıldığı için oldukça önemlidir.
- Kritiklik değerlerine karşı elde edilen yanma oranı değerlerine göre, ThO_2 eklenen yakıtta yanma oranı (burnup) yaklaşık 3 MWg/kgU düşmüştür. Soğutucuya eklenen nanoparçacıkların etkisiyle de yanma oranında bir azalma meydana gelmiştir. Sadece UO_2 yakıtına göre %5 ThO_2 eklenen yakıtda yanma değeri yaklaşık % 8 oranında azalmıştır. Nanoparçacıklar eklendiğinde ise, yanma değerinde ki azalma yaklaşık % 11 oranında olmuştur.
- Elde edilen bağıl güç yoğunluğu değerleri, soğutucu özellikleri ve reaktör tasarım parametreleri ile COBRA IV PC kodu hazırlanmış ve her bir yakıt-soğutucu değişimi için ayrı ayrı çalıştırılmıştır. Elde edilen sonuç dosyalarından, soğutucu sıcaklık değerleri ve DNBR değerleri incelenmiştir. Artan nanoparçacık oranıyla soğutucu sıcaklığının arttığı gözlenmiştir. Ancak % 0,2 oranında kullanılan nanoparçacıklarda akış kanal sonuna yaklaştığında kaynamanın başladığı görülmüştür. Bunun nedeni nanoparçacığın artan oranıyla azalan nanoakışkan yoğunluğunun, sıcaklığı arttırmasıdır. Basınçlı su reaktörlerinin tasarım parametrelerinde göre kanal boyunca kaynama olmaması beklenir. Ancak % 0,2' lik nanoparçacık içeren soğutucuda meydana gelen kaynama beklenilen ve istenen duruma aykırıdır. Bu nedenle bu tez kapsamında elde edilen sonuçlara göre, toryum tabanlı yakıtta nanoparçacık oranının % 0,1'den daha fazla olmaması önerilebilir.
- % 0,1 hacim oranında kullanılan nano parçacıklar en sıcak değerini %5 ThO_2 kullanıldığında almışlardır. En yüksek sıcaklık değeri %5 ThO_2 yakıt ve % 0,1 hacim oranlı Al_2O_3 'in nanoparçacık olarak kullanıldığı nanoakışkanda elde edilmiştir.
- %5 ThO_2 yakıt ve % 0,1 hacim oranlı Al_2O_3 'in nanoparçacık olarak kullanıldığı durumda, soğutucu sıcaklığı, nanoparçacık kullanılmayan duruma göre 3,43 derece artmıştır. Soğutucunun başlangıç sıcaklığı 575 K olduğu ve kanal sonu sıcaklıkları 617,35 K ve

613,92 K olduğundan, sadece su kullanılan soğutucuya göre nanoparçacık kullanımında sıcaklık % 0,6 oranında artmıştır.

- Bir diğer önemli parametre olan DNBR değeri de her bir yakıt- soğutucu kombinasyonu için incelenmiş ve kullanılan yakıt-soğutucu tür ve oranlarının güvenlik zaafiyeti oluşturmadığı görülmüştür. Özellikle % 5 ThO_2 içeren yakıt ve % 0,1 oranında Al_2O_3 içeren soğutucuda kanal sonunda en yüksek sıcaklığa ulaşılmış ve DNBR değerinde limitleri aşan bir sorun olmamıştır. Bu kombinasyonun kullanılması, %5 ThO_2 oranlı yakıt kullanan ancak soğutucu suyunda nanoparçacık barındırmayan durum ile karşılaştırılmış ve sıcaklığın yaklaşık % 0,6 oranında arttığı görülmüştür.
- Toryumun kendisi bir nükleer yakıt değildir, yakıt olarak kullanılması için ^{235}U veya ^{239}Pu gibi fisil maddelere ihtiyaç duyulmaktadır. ^{235}U veya ^{239}Pu ile birlikte kullanıldığında uranyum ihtiyacından tasarruf edilmesini sağlayabilmektedir. Reaktörlerde toryum kullanımının % 20-30 civarında uranyum tasarrufu sağlayacağı düşünülmektedir.
- Sonuç olarak reaktörde farklı tür ve oranda nanoakışkan kullanımı irdelenmiş ve olumlu sonuçlar elde edilmiştir. Ayrıca ülkemizde ki zengin toryum rezervlerinin, nükleer teknolojiye giriş yapan ülkemiz için faydalı olabileceği görülmüştür. Çünkü bu tip yakıtlar barışcıl amaçlı kullanılmakta olup, uzay araçları yada fisyon reaktörlerinde toryum yakıtının yakılmasında fisyon tetikleyicisi olarak reaktörün çalışmasına katkı sağlayacaktır. Ayrıca nano akışkan kullanımının ısı transferini arttırdığı, güncel teknolojik çalışmalarla ispatlanmıştır, bu çalışma kapsamında da nanoakışkan kullanımının sistemden daha çok ısı çekilmesini sağlayarak, reaktör soğutucu suyu sıcaklığını arttırdığı sonucu elde edilmiştir.

KAYNAKLAR

Abdullah, H., Smirnov, A. D., & Tikhomirov, G. V. (2019). Neutronic modelling of nanofluids as a primary coolant in VVER-440 reactor using the Serpent 2 Monte Carlo code. *Journal of Physics: Conference Series*, *1189*(1), 8–12.

Aghaie, M., Zolfaghari, A., Minuchehr, A., Shirani, A., & Norouzi, A. (2012). Transient analysis of break below the grid in Tehran research reactor using the newly enhanced COBRA-EN code. *Annals of Nuclear Energy*, *49*, 1–11.

Aghaie, M., Zolfaghari, A., Minuchehr, M., & Norouzi, A. (2012). Enhancement of COBRA-EN capability for VVER reactors calculations. *Annals of Nuclear Energy*, *46*, 234–243.

Aksan, N. (2019). An overview on thermal-hydraulic phenomena for water cooled nuclear reactors; part II: ALWRs and SCWRs. *Nuclear Engineering and Design*, *354*(August), 110214.

Allaker, R. P. (2012). Nanoparticles and the Control of Oral Biofilms. In *Nanobiomaterials in Clinical Dentistry*. Elsevier Inc.

Ammirabile, L. (2010). Studies on supercritical water reactor fuel assemblies using the sub-channel code COBRA-EN. *Nuclear Engineering and Design*, *240*(10), 3087–3094.

Auerkari, P. (1996). Mechanical and physical properties of engineering alumina ceramics. *VTT Tiedotteita - Valtion Teknillinen Tutkimuskeskus*, *1792*.

Avramova, M. (2020). Developments in thermal-hydraulic sub-channel modeling for whole core multi-physics simulations. *Nuclear Engineering and Design*, *358*(October 2019), 110387.

Braz Filho, F. A., Caldeira, A. D., & Borges, E. M. (2005). A problem in the COBRA-EN code related to the void fraction calculation. *Annals of Nuclear Energy*, *32*(16), 1782–1785.

Briesmeister, J. F. (2000). A General Monte Carlo N-Particle Transport Code. *Version 4B*.

B.Webb (1988).PC-IV, A Personal Computer Version of Cobra-IV-I for Thermal-Hydraulıc Analysis of Rod Bundle Nuclear Fuel Elements and Cores.

Cheng, J. P., Yan, L. M., & Li, F. C. (2016). CFD simulation of a four-loop PWR at asymmetric operation conditions. *Nuclear Engineering and Design*, *300*, 591–600.

Coşkun, H. (2010). *Alternatif Nükleer Yakıtlı Çakıl Yataklı Modüler Reaktörün Monte Carlo Yöntemiyle Nötronik Analizi*. Gazi Üniversitesi.

Dwiddar, M. S., Badawi, A. A., Abou-Gabal, H. H., & El-Osery, I. A. (2015). Investigation of different scenarios of thorium-uranium fuel distribution in the VVER-1200 first core. *Annals of Nuclear Energy*, *85*, 605–612.

Ebrahimian, M., & 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.

Erfaninia, A., Hedayat, A., Mirvakili, S. M., & Nematollahi, M. R. (2017). Neutronic-thermal hydraulic coupling analysis of the fuel channel of a new generation of the small modular pressurized water reactor including hexagonal and square fuel assemblies using MCNP and CFX. *Progress in Nuclear Energy*, *98*, 213–227.

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.

Frybort, J. (2014). Comparison of the radiological hazard of thorium and uranium spent fuels from VVER-1000 reactor. *Radiation Physics and Chemistry*, *104*, 408–413.

Ghahdarijani, A. M., Hormozi, F., & 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.

Ghazanfari, V., Talebi, M., Khorsandi, J., & 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.

Ghazanfari, V., Talebi, M., Khorsandi, J., & 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.

Glück, M. (2007). Sub-channel analysis with F-COBRA-TF - Code validation and approaches to CHF prediction. *Nuclear Engineering and Design*, *237*(6), 655–667.

Gürbüz, E. Y., Sözen, A., Keçebaş, A., & Özbaş, E. (2020). Experimental and numerical investigation of diffusion absorption refrigeration system working with ZnOAl2O3 and TiO2 nanoparticles added ammonia/water nanofluid. *Experimental Heat Transfer*, *00*(00), 1–26.

Hadad, K., Hajizadeh, A., Jafarpour, K., & Ganapol, B. D. (2010). Neutronic study of nanofluids application to VVER-1000. *Annals of Nuclear Energy*, *37*(11), 1447–1455.

Hadad, Kamal, & Kowsar, Z. (2016). Twofold application of nanofluids as the primary coolant and reactivity controller in a PWR reactor: Case study VVER-1000 in normal operation. *Annals of Nuclear Energy*, *97*, 179–182.

Hançerlioğulları, A. (2006). Monte Carlo Simülasyon Metodu Ve MCNP Kod Sistemi, Kastamonu Eğitim Dergisi. *2*, 545–556.

Hassan, M. I., Alzarooni, I. A., & Shatilla, Y. (2015). The Effect of Water-Based Nanofluid Incorporating Al2O3 Nanoparticles on Heat Pipe Performance. *Energy Procedia*, *75*, 3201–3206.

Henry, R., Tiselj, I., & Snoj, L. (2017). CFD/Monte-Carlo neutron transport coupling scheme, application to TRIGA reactor. *Annals of Nuclear Energy*, *110*, 36–47.

Hossain, A., Islam, S., Hossain, T., Mohammad Salahuddin, A. Z., & Sarkar, A. R. (2019). An intelligent approach for thermal-hydraulic studies on safety and efficiency of nuclear power plant. *Energy Procedia*, *160*(2018), 436–442.

Jang, S.P. and Choi, S. U. . (2004). Free Convection in a Rectangular Cavity Benard Convection with Nanofluids. *Proceedings of the IMECE*.

Janos, T. (2011). Long-Term Operation of VVER Power Plants. *Nuclear Power - Deployment, Operation and Sustainability*, *May*.

Jimenez Escalante, J., Di Marcello, V., Sanchez Espinoza, V., & Perin, Y. (2017). Application of the ATHLET/COBRA-TF thermal-hydraulics coupled code to the analysis of BWR ATWS. *Nuclear Engineering and Design*, *321*, 318–327.

Kang, S. W., Wei, W. C., Tsai, S. H., & Yang, S. Y. (2006). Experimental investigation of silver nano-fluid on heat pipe thermal performance. *Applied Thermal Engineering*, *26*(17–18), 2377–2382.

Kianpour, R., & 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 Energy*, *133*, 623–636.

Lamarsh, J. R., & Baratta, A. J. (2016). *Nükleer Mühendisliğe Giriş (*Birinci Baskı*)*, Türkiye: Palme Yayınevi.

Li, Y., Zhou, J., Tung, S., Schneider, E., & Xi, S. (2009). A review on development of nanofluid preparation and characterization. *Powder Technology*, *196*(2), 89–101.

Liu, X. J., & Scarpelli, N. (2015). Development of a sub-channel code for liquid metal cooled fuel assembly. *Annals of Nuclear Energy*, *77*, 425–435.

Liu, X. J., Yang, T., & Cheng, X. (2013). Thermal-hydraulic analysis of flow blockage in a supercritical water-cooled fuel bundle with sub-channel code. *Annals of Nuclear Energy*, *59*, 194–203.

İnternet: *Nükleer Enerji Dünyası*. URL: http://www.nukleer.web.tr/. Son Erişim Tarihi: 27.11.2020

İnternet: Westinghouse Technology Systems Manual Power Distribution Limits. URL: https://www.nrc.gov/docs/ML1122/ML11223A208.pdf. Son Erişim Tarihi: 27.11.2020

İnternet: *Türkiye Atom Enerjisi Kurumu*.URL: https://www.taek.gov.tr/tr/. Son Erişim Tarihi: 27.11.2020

M.Adil Yükselen. (2006). *Bölüm 2 korunum denklemleri*. UZB 362 Sıkıştırılabilir Aerodinamik 2006-2007 Bahar dönemi Ders Notları.

Mahbubul, I. M., Saidur, R., & Amalina, M. A. (2012). Latest developments on the viscosity of nanofluids. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, *55*(4), 874–885.

Malmir, H., & Vosoughi, N. (2015). Calculation and analysis of thermal-hydraulics fluctuations in pressurized water reactors. *Annals of Nuclear Energy*, *76*, 75–84.

Mousavizadeh, S. M., Ansarifar, G. R., & 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.

Nematolahi, M., Behzadinejad, B., & 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.

Nourollahi, R., Esteki, M. H., & 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*(August 2018), 46–61.

Pak, B. C., & Cho, Y. I. (1998). Hydrodynamic and heat transfer study of dispersed fluids with submicron metallic oxide particles. *Experimental Heat Transfer*, *11*(2), 151–170.

ROSATOM. (2015). The VVER today. *State Atomic Energy Corporation ROSATOM*, 50.

Saadati, H., Hadad, K., & 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.

Safaei Arshi, S., Mirvakili, S. M., & Faghihi, F. (2010). Modified COBRA-EN code to investigate thermal-hydraulic analysis of the Iranian VVER-1000 core. *Progress in Nuclear Energy*, *52*(6), 589–595.

Safarzadeh, O., Shirani, A. S., Minuchehr, A., & Saadatian-Derakhshandeh, F. (2014). Coupled neutronic/thermo-hydraulic analysis of water/Al2O 3 nanofluids in a VVER-1000 reactor. *Annals of Nuclear Energy*, *65*, 72–77.

Snoj, L., & Ravnik, M. (2006). Calculation of Power Density With Mcnp in Triga Reactor. *International Conference, Nuclear Energy for New Europe 2006*, 1–6.

Tóth, S., & Aszódi, A. (2010a). CFD analysis of flow field in a triangular rod bundle. *Nuclear Engineering and Design*, *240*(2), 352–363.

Tóth, S., & Aszódi, A. (2010b). CFD study on coolant mixing in VVER-440 fuel rod bundles and fuel assembly heads. *Nuclear Engineering and Design*, *240*(9), 2194–2205.

Ünak, T. (2000). What IS the potential use of thorium in the future energy production technology? *Progress in Nuclear Energy*, *37*(1–4), 137–144.

Vajjha, R. S., Das, D. K., & Mahagaonkar, B. M. (2009). Density Measurement of Different Nanofluids and Their Comparison With Theory. *Petroleum Science and Technology*, *27*(6), 612–624.

Xia, H., Lu, C., Wu, Y., Wu, Z., Tian, W., Su, G. H., & Qiu, S. (2019). Development of a subchannel analysis code and its application to annular fuel assemblies. *Annals of Nuclear Energy*, *129*, 428–436. https://doi.org/10.1016/j.anucene.2019.02.016

Zarifi, E., Jahanfarnia, G., & Veysi, F. (2013). Neutronic simulation of water-based nanofluids as a coolant in VVER-1000 reactor. *Progress in Nuclear Energy*, *65*, 32–41. https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2013.01.004

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler



Soyadı, adı : UZUN Sinem

Uyruğu : T.C.

Doğum tarihi ve yeri : 10.09.1988, Ankara

Medeni hali : Evli

e-mail : keysinem@gmail.com

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Tarihi
Doktora	Gazi Üniversitesi / Enerji Sistemleri Müh.	2020
Yüksek lisans	Gazi Üniversitesi / Enerji Sistemleri Müh.	2015
Lisans	Hacettepe Üniversitesi / Nükleer Enerji Müh.	2012

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2015-Halen	Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi	Araştırma Görevlisi

Yabancı Dil

İngilizce

Yayınlar

Genç Y., Uzun S. ve Acır A., "VVER-1000 nükleer güç reaktöründe kritiklik ve bağıl güç yoğunluk dağılımının incelenmesi ", ***Politeknik Dergisi***, 23(4): 1379-1385, (2020).

Uzun S., Genç Y. ve Acır A., "VVER-1000 reaktöründe alüminyum nanoparçacıklı soğutucunun termal performansının incelenmesi", ***Politeknik Dergisi***, Erken Görünüm.

Uzun S., Genç Y. ve Acır A., "UGD ve MOX yakıtı kullanılarak VVER-1000 nükleer reaktöründe nötronik ve termal performansın incelenmesi", ***Politeknik Dergisi***, Erken Görün



GAZİ GELECEKTİR..