



POLİTEKNİK DERGİSİ

*JOURNAL of POLYTECHNIC*

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.org.tr/politeknik>



# VVER-1000 reaktöründe alüminyum nanoparçacıklı soğutucunun termal performansının incelenmesi

## *Investigation of thermal performance of aluminum nanoparticle coolant in vver-1000 reactor*

*Yazar(lar) (Author(s)):* Sinem UZUN<sup>1</sup>, Yasin GENÇ<sup>2</sup>, Adem ACIR<sup>3</sup>

*ORCID<sup>1</sup>:* 0000-0002-2814-1062

*ORCID<sup>2</sup>:* 0000-0002-2786-4824

*ORCID<sup>3</sup>:* 0000-0002-9856-3623

**Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article):** Uzun S., Genç Y. ve Acır A., “VVER-1000 reaktöründe alüminyum nanoparçacıklı soğutucunun termal performansının incelenmesi”, *Politeknik Dergisi*, 24(3): 1009-1015, (2021).

**Erişim linki (To link to this article):** <http://dergipark.org.tr/politeknik/archive>

**DOI:** 10.2339/politeknik.777890

# VVER-1000 Reaktöründe Alüminyum Nanoparçacıklı Soğutucunun Termal Performansının İncelenmesi

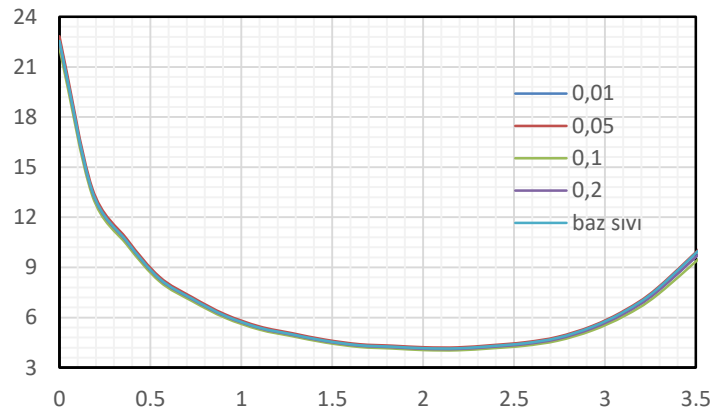
## Investigation of Thermal Performance of Aluminum Nanoparticle Coolant in VVER-1000 Reactor

### Önemli noktalar (Highlights)

- ❖ VVER-1000
- ❖ MCNP

### Grafik Özet (Graphical Abstract)

DNBR, baz sıvıda 4,158'e düşerken, % 0,1 hacim oranında ise 4,035'e düşmüştür./ While DNBR decreased to 4.158 in the base liquid, it decreased to 4.035 at the rate of 0.1% volume.



### Amaç (Aim)

Bu çalışmada amaç, nano parçacık içeren ve bu yüzden yüksek oranda ısı depolayabilme ve taşıyabilme özelliklerine sahip nano parçacık-saf su karışımı nanoakışkanların kullanılmasıyla, nükleer reaktörün ısıl verimini arttırmaktır./The aim of this study is to increase the thermal efficiency of the nuclear reactor by using nano particle-pure water mixture nanofluids that contain nanoparticles and therefore have the ability to store and carry a high amount of heat.

### Tasarım ve Yöntem (Design & Methodology)

MCNP, COBRA/ MCNP, COBRA

### Özgünlük (Originality)

Homojen yakıt kullanımı ile reaktör soğutucu özellikleri incelendi. / Using homogeneous fuel, reactor coolant properties are investigated.

### Bulgular (Findings)

Nano akışkan kullanımında reaktörün ısı iletiminde en verimli oranın %0,1 oranında  $Al_2O_3$  olduğu belirlenmiştir./ It was determined that the most efficient rate of 0.1%  $Al_2O_3$  in the heat transfer of the reactor in the use of nano fluid.

### Sonuç (Conclusion)

Soğutucu içerisinde nano parçacıkların kullanımıyla DNBR değerinde bir miktar düşüşe neden olsa da bu azalışın güvenlik zafiyeti oluşturmayacak düzeyde olduğu sonucuna varılmıştır. / It was concluded that the use of nanoparticles in coolant cause a slight decrease in DNBR value, but the decreased DNBR value could not create any security weakness.

### Etik Standartların Beyanı (Declaration of Ethical Standards)

Bu makalenin yazar(lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler. / The author(s) of this article declare that the materials and methods used in this study do not require ethical committee permission and/or legal-special permission.

# VVER-1000 Reaktöründe Alüminyum Nanoparçacıklı Soğutucunun Termal Performansının İncelenmesi

*Araştırma Makalesi / Research Article*

**Sinem UZUN<sup>1,2</sup>, Yasin GENÇ<sup>1</sup>, Adem ACIR<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Teknikokullar- Yenimahalle/Ankara

<sup>2</sup>Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Yalnızbağ Kampüsü/Erzincan

(Geliş/Received : 07.08.2020 ; Kabul/Accepted : 17.09.2020 ; Erken Görünüm/Early View : 23.09.2020)

## ÖZ

Nükleer güç reaktörlerinin güvenlik ve tasarım özellikleri incelenirken termal analizlerin önemi büyüktür. Bu çalışmada amaç, saf su ve Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nano parçacık içeren soğutucu akışkanın VVER -1000 nükleer reaktörünün termal performansına etkisinin incelenmesidir. Bu amaçla, VVER-1000 reaktörünün denge durumunda (sürekli rejimde) ve BOC (döngü başlangıcı) koşulunda, 3,7 % zenginlikteki UO<sub>2</sub> yakıt için bağıl güç yoğunluk dağılımları MCNP kodu ile elde edilmiş ve daha sonra COBRA kodu ile termal analizler yapılarak, reaktörün güvenlik kriterleri için önem arz eden DNBR (departure from nucleate boiling ratio) değeri incelenmiştir. Ayrıca COBRA kodu ile reaktörde kullanılan soğutucu akışkanlara ait sıcaklık, entalpi, yoğunluk gibi termal değerler ve yakıt ve zarf bölgelerine ait sıcaklık değerleri hesaplanmıştır. Yapılan analizler sonucu, nano akışkan kullanımında reaktörün ısı iletiminde en verimli soğutucunun, % 0,1 oranında Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> eklenmiş akışkan olduğu belirlenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Nano akışkan, ısı transferi, VVER-1000, MCNP, keff.

## Investigation of Thermal Performance of Aluminum Nanoparticle Coolant in VVER-1000 Reactor

### ABSTRACT

Thermal analysis is of great importance when examining the safety and design features of nuclear power reactors. The aim of this study is to examine the effect of pure water and coolant containing Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanoparticles on thermal performance of VVER -1000 nuclear reactor. In this study, the VVER-1000 reactor is in steady state and BOC (beginning of cycle) condition, relative power density distributions for UO<sub>2</sub> fuel with 3.7% enrichment were obtained with the MCNP code and then, thermal analysis were made with the COBRA code and DNBR value, which is very important for the safety criteria of the reactor, was examined. In addition, with the COBRA code, thermal values such as temperature, enthalpy, density, and temperature values of the fuel and clad regions, which are of great importance for the reactor, were calculated. As a result of the analysis, it was determined that the most efficient coolant is 0.1% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> fluid in the heat transfer of the reactor.

**Keywords:** Nanofluid, heat transfer, VVER-1000, MCNP, keff.

### 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Günümüzde gelişen teknoloji ile birlikte nükleer santrallerde hem güvenlik hemde alternatif nükleer yakıtların kullanımı yardımıyla nükleer atıkların azaltılması yönünde çalışmalar yapılmaktadır [1,2]. Ticari fisyon nükleer santralleri bu anlamda geliştirilmeye açık reaktörlerdir. Günümüzde yaygın olarak dünya üzerinde bulunan fisyon reaktörlerinden birisi de VVER nükleer reaktörleridir. VVER bir tür basınçlı su reaktörü olup geleneksel ticari basınçlı su reaktörleri ile bazı benzerlikleri ve farklılıkları bulunmaktadır [3]. 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 performans davranışları incelenmekte ve bir çok araştırmacı

tarafından araştırılmaktadır [4-6]. Yapılan çalışmalarda uluslararası Nükleer Enerji Ajansı (NEA) tarafından paylaşılan reaktör parametrelerine bağlı olarak, farklı araştırmacılar tarafından modellenme yapılmakta ve kullanılması planlanan bilgisayar programları ile nükleer veri kütüphanelerinin uygunluğu ve doğruluğunun test edilmesi mümkün olabilmektedir [7,8].

Nükleer reaktör tasarım ve güvenlik özellikleri incelenirken, termal ve nötronik analizler ayrı ayrı önem taşımaktadır. Yapılan nötronik çalışmalarda, reaktör tasarım parametrelerinde meydana gelen değişimler, reaktör geometrisindeki modellenme değişimleri ve farklı hesaplama kodlarının karşılaştırmasını yapmak [9], alternatif yakıt kullanımı gibi [10] farklılıklar incelenmektedir. Aynı zamanda reaktörde kullanılan soğutuculara reaktör performansını etkilemektedir.

Reaktörde kullanılan yakıt tipine bağlı olarak fisyon reaksiyonları sonucu açığa çıkan ısı soğutucular tarafından absorbe edilmekte, oluşan buhar türbine iletilerek iş elde edilmektedir. Reaktör korunda buhar

\*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)  
e-posta : simsek@gazi.edu.tr

sıcaklıklarını artırarak reaktörden elde edilecek enerji oranının artırılması için soğutucu akışkanlarda  $Al_2O_3$  ve benzeri farklı nano parçacıklar kullanarak soğutucu akışkanın ısı absorbe etme özelliği araştırılmaya kayda değerdir. Son yıllarda nano akışkanlar, ısı transferini iyileştirmeye yönelik farklı alanlarda kullanılmaya başlanmıştır. Nano akışkan kullanımı, ısı boruları, güneş panelleri, oto radyatör vb. bir çok alanda son zamanlarda birçok çalışmada farklı amaçla incelenmiştir.

Nano akışkanlarla ilgili, ısı borulu havadan havaya ısı değiştiricilerinde nano akışkan performansının incelenmesi [11], nano yağlayıcılarının soğutma sistemlerinde kullanılması [12], yatay bir tüpteki  $Al_2O_3$  /su karışımı nano akışkanın termo fiziksel özelliklerin incelenmesi ve sonuç olarak  $Al_2O_3$  nano akışkanların, saf suya kıyasla sistemin genel termal performansını % 94 oranında arttırdığı [13], yapılan çalışmalara bazı örneklerdir. Öte yandan nükleer reaktörlerin termal performans incelemeleri yapılırken reaktör için büyük önem arz eden, yakıt, zarf ve soğutucu bölgelerindeki sıcaklık değerleri öncelikle incelenmekte ve güvenlik kriterleri çerçevesinde ısı verimi arttırmaya yönelik çeşitli öneriler getirilmektedir. Bu önerilerden son çalışmalarda öne çıkan, soğutucu akışkan içinde farklı hacim oranlarında ve farklı türlerde nano parçacık kullanımındır.

Gözenekli ortam yaklaşımı (porous media approach) kullanılarak, VVER-1000 reaktör çekirdeğinde soğutucu olarak nanoakışkanların termal-hidrolik analizini yapan bir çalışmada [14], elde edilen sonuçlar, soğutucunun sıcaklığının  $Al_2O_3$  ve  $TiO_2$  nano parçacıklarının artan konsantrasyonu ile arttığını göstermektedir. Bu nedenle, saf su ile karşılaştırıldığında nanoakışkanların daha yüksek ısı transfer katsayısı nedeniyle soğutucu akış hızını azaltabileceği sonucuna varılmıştır.

Bir diğer çalışmada, bir hafif su nükleer reaktörünün ilk çalışma döngüsü sırasında hem bir soğutucu hem de bir reaktivite kontrolörü olarak su / gümüş (Ag) nanoakışkan seçiminin etkileri araştırılmıştır. Sonuçlar, Ag nanoparçacıklı nano akışkanın gereken maksimum seviyesinin, döngünün başlangıcında %1,3 hacim olduğunu göstermektedir. Nanoparçacık varlığında güvenlik marjları göz önüne alındığında, MDNBR (minimum departure from nucleate boiling ratio) değeri 2,16 olarak hesaplanmıştır [15].

Faghihi ve ark. ise, farklı zenginlikteki  $UO_2$  yakıtıyla yüklenmiş VVER-1000 tipi reaktörün termal hidrolik analizini alt-kanallı termal-hidrolik analiz kodlarından COBRA kodu ile yapmışlardır. Gerekli güç dağılımı ve sıcak kanal faktörleri MCNP-5 kodu kullanılarak 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 [16].

Safarzadeh ve ark., çalışmalarında [17] heterojen bir dizilime sahip  $UO_2$  yakıtlı VVER-1000 reaktörünün birincil soğutma sisteminde nano parçacıkların kullanılmasının termal-hidrolik ve nötronik özellikleri üzerine etkisini araştırmışlardır. Kritik borik asit, nispi güç dağılımı, basınç düşüşü ve soğutucu sıcaklık dağılımları su /  $Al_2O_3$  nano akışkan için incelenmiştir. Nano parçacıkların düşük hacimli fraksiyonunun kritik borik asitte yaklaşık %3'e kadar minimum bir etkiye ve nispi güç dağılımının maksimumunda yaklaşık %2'sine sahip olduğu ve ısı transferinin saf suya kıyasla arttırıldığı gözlenmiştir.

Bu çalışmada ise, diğer çalışmalardan farklı olarak  $UO_2$  yakıtının homojen olarak kora yerleştirildiği VVER 1000 reaktöründe MCNP5 [19] kodu yardımıyla güç dağılım faktörleri elde edilmiş ve saf su ve hacimce farklı oranlarda alüminyum oksit ( $Al_2O_3$ ) nano parçacık içeren reaktör soğutucu akışkanı kullanımının termal performans üzerine etkileri COBRA [18] kodu ile yapılmıştır. Nano parçacığın hacim oranları sırasıyla % 0,01, % 0,05, % 0,1 ve % 0,2 seçilerek, nano akışkandaki hacimsel değişimin reaktörün termal özelliklerine etkisi incelenmiştir.

## 2. REAKTÖR GEOMETRİSİ (REACTOR GEOMETRY)

VVER-1000 nükleer reaktörü 3+ nesil nükleer reaktör olup, bir tür basınçlı su reaktörü olmakla beraber geleneksel ticari basınçlı su reaktörü ile bazı benzerlikleri ve farklılıkları vardır. VVER nükleer reaktörleri diğer tip nükleer reaktörlerden ayıran en temel özelliklerin başında yakıt demetinin tasarımı ve reaktör kor geometrisi gelmektedir [3]. VVER-1000 yakıt demeti, dünyada en yaygın kullanılan PWR reaktörlerinden farklı olarak altıgen yapıya sahiptir ve ayrıca VVER-1000 reaktörlerinin buhar üreteçleri yatay olarak konumlandırılmıştır. Bu çalışmada incelenen VVER-1000 yakıt demetinin temel tasarım özellikleri Tablo 1'de verilmiştir. VVER -1000 korunda toplam 163 yakıt demeti mevcuttur. Her bir yakıt demetinde 312 tane yakıt çubuğu bulunmaktadır.

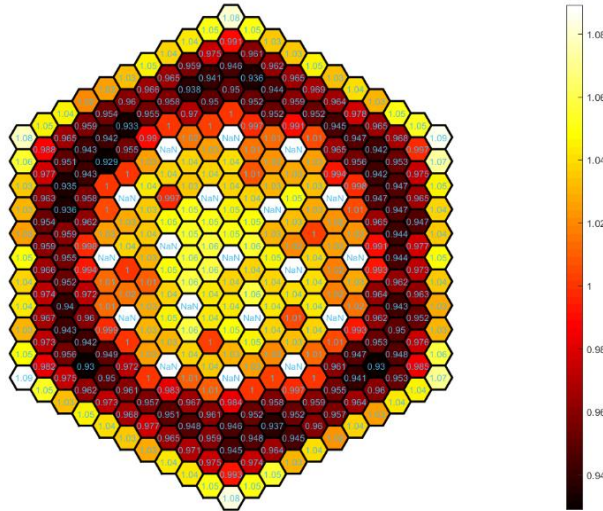
**Çizelge 1.** VVER-1000 genel karakteristik özellikleri [14,18]

Reaktör Çalışma Şartları	
Referans basıncı (MPa)	15.7
Reaktör termal gücü (MWt)	3000
Soğutucu giriş entalpisi (kJ/kg)	1290
Soğutucu giriş akış oranı ( $m^3/s$ )	84800
Yakıt Demeti	
Kafes yapısı (lattice type)	Altıgen
Kordaki yakıt demeti sayısı	163
Yakıt demetleri arasındaki mesafe (mm)	23,6

Bir yakıt demetindeki yakıt çubuğu sayısı	312
Yakıt Çubuğu	
Merkezdeki boşluğun çapı (mm)	1,5
Yakıt peletinin dış çapı (mm)	7,57
Zarf malzemesinin iç çapı (mm)	7,73
Zarf malzemesinin dış çapı (mm)	9,1
Yakıt peletinin malzemesi	LEU
Zarf malzemesi	%98,97 Zr, %1 Nb, %0,03 Hf
Yakıt çubukları arasındaki mesafe (mm)	12,75
Kılavuz tüpü	
Kılavuz tüpü sayısı (guide tube)	18
İç çapı / Dış çapı (mm)	10,9 / 12,6 mm

Çizelge 1’de verilen VVER-1000 nükleer reaktörünün geometrik özellikleri kullanılarak reaktörün yakıt demeti MCNP [19] nötronik kodu yardımıyla Şekil 1’de gösterildiği gibi modellenmiştir. VVER nükleer reaktöründe kullanılan yakıt peleti malzemeleri LEU (Low Enriched Uranium) yani düşük zenginlikteki uranyumdur. VVER 1000 reaktörünün koru homojen olarak %3,7 zenginlikteki  $UO_2$  nükleer yakıt kullanılarak modellenmiş ve farklı nano akışkan oranları için reaktör korunda oluşan bağıl güç yoğunluk dağılımları elde edilmiştir.

Bu çalışmada, Şekil 1’de belirtilen yakıt demeti düzeni için MCNP5 girdi dosyaları oluşturulmuş ve endf66 nükleer veri kütüphanesi kullanılarak reaktörün bağıl güç yoğunluğu değerleri elde edilmiştir.

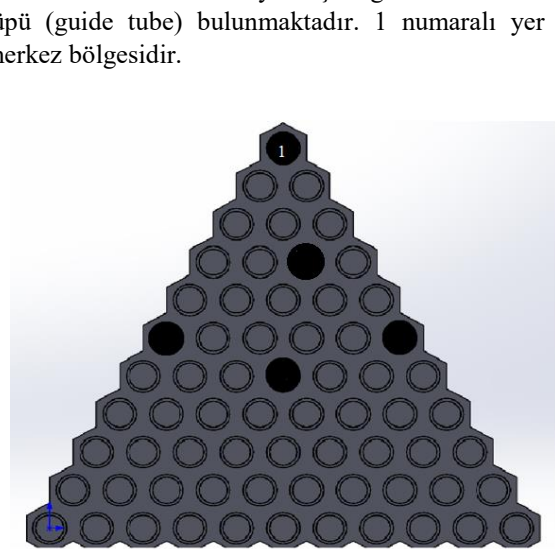


**Şekil 1.** Yakıt demeti düzeni ve saf su için bağıl güç yoğunluğu değerleri (Fuel assembly layout and relative power distributions for pure water)

çıkılmaktadır ve esasen tüm fisyon ürünleri bir dereceye kadar reaktör zehirleri olarak sınıflandırılmaktadır. Çoğu yakıt yandığında bu yan ürünler reaktörde yavaş yavaş birikir ve uzun vadede reaktivite üzerinde olumsuz etki oluşturmaktadır. Ancak Xe (Ksenon) ve Sm (Samarium),  $10^4$  ve  $10^6$  mertebelerindeki yutma tesir kesitlerinden dolayı reaktivite üzerinde en büyük etkiye sahip iki önemli zehir olarak nitelendirilebilir [20]. Bu izotopların üretim ve tüketimi reaktördeki nötron akısına bağlıdır. Nötron akısındaki herhangi bir değişim, bu iki izotop miktarında değişime sebep olacaktır. Xe ve Sm etkisini azaltmak için reaktörlerde sıklıkla güç ve dolayısıyla nötron akı değişimi yapılmaz. Bu nedenle bu çalışma kapsamında yapılan analizlerde yakıt bünyesinde Ksenon (Xe) ve Samaryum (Sm) konsantrasyonunun bulunmadığı varsayılmıştır.

Bu çalışmada, soğutucu akışkan olarak saf su ve saf su/ $Al_2O_3$  nano akışkan karışımını kullanan VVER 1000 nükleer reaktör yakıt demeti MCNP nükleer kodu yardımıyla modellenmiş ve  $Al_2O_3$  nano parçacığının farklı hacim oranları için bağıl güç yoğunluğu değerleri hesaplanmıştır. Elde edilen bu değerler termal analizlerin temelini oluşturmaktadır.

Termal analizler için kullanılan COBRA kodu kütle korunumu, enerji ve momentum koruma yasalarını dikkate alarak çalışır. COBRA analizi yapılırken kor veya yakıt demeti alt kanallara ayrılarak daha detaylı inceleme yapmaya olanak tanımaktadır. Bu çalışma yapılırken COBRA kodu için bir yakıt demetinin altıda biri ele alınmış ve Şekil 2’deki gibi modellenmiştir. Mevcut modelde 61 adet yakıt çubuğu ve 4 adet kılavuz tüpü (guide tube) bulunmaktadır. 1 numaralı yer ise merkez bölgesidir.



**Şekil 2.** Bir yakıt demetinin 1/6 modeli (1/6 model of a fuel assembly)

Nötronik hesaplamalar için, yakıt sıcaklığı 1027 K ve soğutucu akışkan da dahil olmak üzere yakıt olmayan tüm bileşenlerin sıcaklığı 575 K olarak seçilmiştir. Reaktörde fisyon sırasında birçok fisyon ürünü ortaya

### 3. NÜMERİK SONUÇLAR (NUMERICAL RESULTS)

Bir termal sistemde nanoakışkan kullanarak, ısı transferi artışı elde edilebilir bu nedenle, nanoakışkanlar konusunda yapılan çalışmaların çoğunluğu, nano metal kullanımıyla ısıl iletkenlik katsayısı ve dolayısıyla ısı transferi iyileştirmesi üzerinedir [21].

Nano akışkanlı soğutucu analizi yapılırken, soğutucunun yoğunluk, viskozite, özgül ısı ve termal iletkenlik değerleri değişmektedir. Yoğunluk hesabı yapılırken Eş.1 de belirtilen denklem kullanılır [22].

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

Viskozite ve termal iletkenlik [23] ve de özgül ısı [24] değerleri hesaplamaları içinde yine Eş. 2-4 de gösterilen ifadeler kullanılmaktadır.

$$\frac{\mu_{nf}}{\mu_p} = 123\phi^2 + 7.3\phi + 1 \quad (2)$$

$$\frac{K_{nf}}{K_p} = 4.97\phi^2 + 2.72\phi + 1 \quad (3)$$

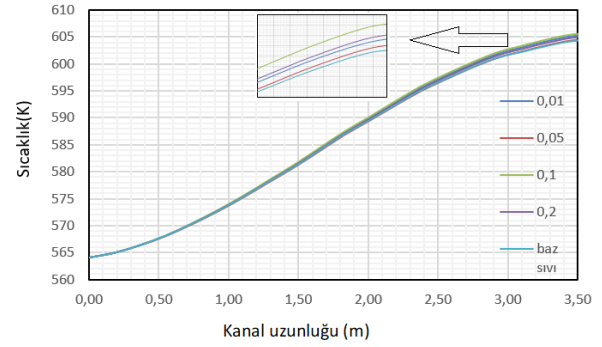
$$Cp_{nf} = (1 - \phi)Cp_f + \phi Cp_p \quad (4)$$

$\phi$  ifadesi, nano parçacığın hacimsel oranını göstermektedir. Bu çalışmada kullanılan nano parçacık olan  $Al_2O_3$  ile ilgili bazı termo fiziksel özellikler Çizelge 2’ de verilmiştir.

**Çizelge 2.** Nano parçacık ve suyun termo fiziksel özellikleri (Thermo-physical properties of nano particles and water) [19]

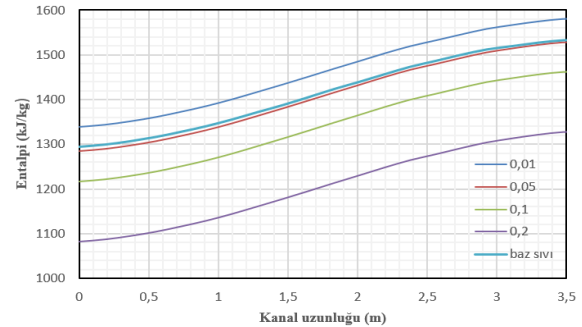
Özellik	C (J/kg K)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	k (W/mK)	a (m <sup>2</sup> /s)
su	4179	997.1	0.605	1.47
$Al_2O_3$	765	3970	40	1317

COBRA kodu ile yapılan analizler sonucu, reaktör için fazlaca önem arz eden termal değerler bulunmuş ve incelenmiştir. Şekil 3’ de nano akışkanın değişen hacim oranlarına göre soğutucunun kanal boyunca sıcaklık değişimi gösterilmiştir.



**Şekil 3.** Nanoakışkanın değişen hacim oranları için soğutucu sıcaklığının kanal boyu değişimi (Axial coolant temperature distribution for varying volume ratios of nanofluid)

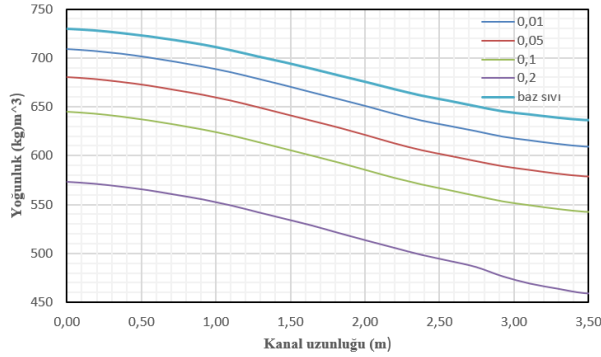
Şekil 3’de gösterilen sıcaklık değerlerine göre, soğutucu olarak yalnız su (baz sıvı) kullanıldığında, kanal sonunda soğutucu sıcaklığı maksimum 604,2 K sıcaklığına ulaşırken, 0,01 oranında alümina nano parçacığı soğutucuya eklendiğinde, bu sıcaklık 604,96 K’ye ve % 0,1 oranında nanoparçacık eklendiğindeyse ise 605,58 K değerine ulaşmaktadır. Zarifi ve ark. [14] yaptığı çalışmada,  $Al_2O_3$  nano parçacığının değişen hacim oranlarına göre termal karakteristikleri üzerine incelemeler yapılmış ve benzer sonuçlar elde edilmiştir. Çalışmada sıcaklık değeri kanal sonunda yaklaşık 600 K değerine ulaşmıştır. Ayrıca Hadad ve ark. [5] çalışmalarında sıcaklık için benzer sonuçlar elde etmişlerdir.



**Şekil 4.** Nanoakışkanın değişen hacim oranları için soğutucu entalpi değerinin kanal boyu değişimi (Axial coolant enthalpy distribution for varying volume ratios of nanofluid)

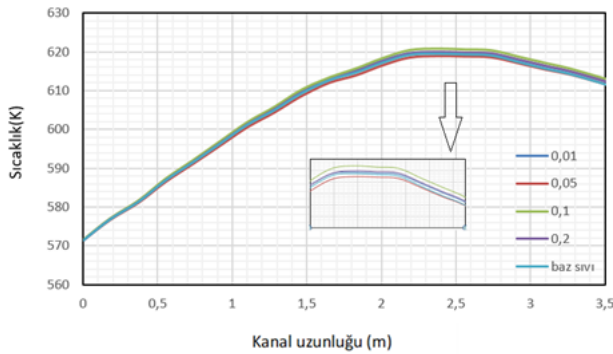
Şekil 4’ de nano akışkanın değişen hacim oranlarına göre entalpi değişimi gösterilmiştir. Şekil 4’deki grafiğe göre entalpi değeri baz sıvı kullanıldığında 1294 kJ/kg değerinden, kanal boyunca olan akış sonunda 1532,75 kJ/kg değerine ulaşmaktadır. % 0,01 hacim oranında nano akışkan kullanıldığında kanal sonunda entalpi değeri 1581,59 kJ/kg değerine ve % 0,1 hacimli nano akışkan kullanıldığında ise 1462 kJ/kg değerine ulaşmaktadır.

ulaşmaktadır. Referans [14]'deki çalışmada benzer sonuçlar elde edilmiş ve entalpi değeri, nanoakışkanın değişen hacim oranlarına göre 1290 kJ/kg değerinden 1500 kJ/kg değerlerine kadar çıkmıştır.



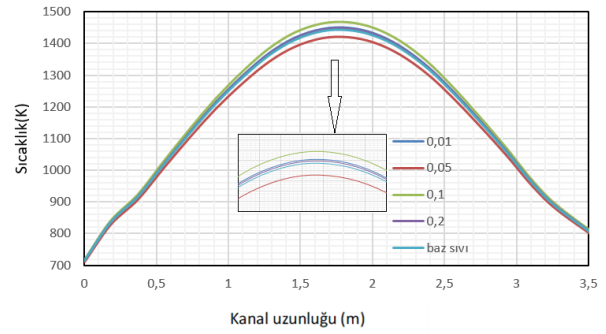
**Şekil 5.** Nanoakışkanın değişen hacim oranları için soğutucu yoğunluğunun kanal boyu değişimi (Axial coolant density distribution for varying volume ratios of nanofluid)

Şekil 5'te nano akışkanın değişen hacim oranlarına göre yoğunluk değişimi gösterilmiştir. Baz sıvı kullanıldığında yoğunluk değeri sıcaklığın artmasına bağlı düşme eğilimi göstererek, kanal akışı sonunda 636,4 kg/m<sup>3</sup> değerine ulaşmıştır. %0,01 hacimli nanoakışkan kullanıldığında 608,36 kg/m<sup>3</sup> değerine ve % 0,1 hacimli nanoakışkanda ise 541,88 kg/m<sup>3</sup> değerine ulaşmıştır.



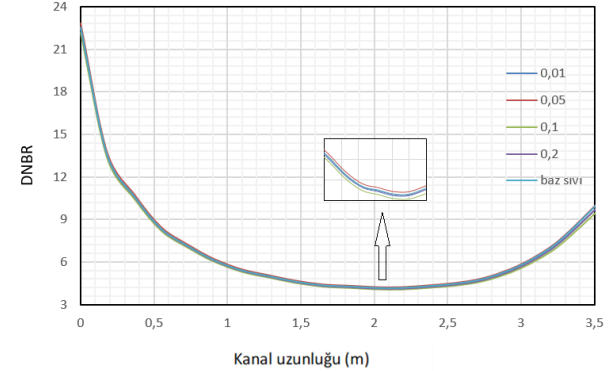
**Şekil 6.** Zarf bölgesi sıcaklık değişimi (Axial clad temperature distribution)

Şekil 6'da nano akışkanın değişen hacim oranlarına göre, zarf iç ve dış bölgelerinin sıcaklık değişimleri gösterilmiştir. Şekil 6'da elde edilen zarf iç bölgesi sıcaklık değeri, baz sıvı için 609,7 K iken, % 0,01 hacim oranlı nano akışkan için 610,6 K ve % 0,1 hacim oranlı nano akışkan için ise 611,2 K olarak elde edilmiştir. Safarzadeh ve ark. [17], yaptıkları çalışmada benzer sonuçlar elde ederek, 600-605 K skalasında değişen sıcaklık değerlerine ulaşmışlardır.



**Şekil 7.** Yakıt merkezi sıcaklık değişimi (Axial fuel temperature distribution)

Şekil 7'de nano akışkanın değişen hacim oranlarına göre, yakıt iç ve dış bölgelerinin sıcaklık değişimleri gösterilmiştir. Şekil 7'de elde edilen yakıt merkez bölgesi sıcaklık değeri, baz sıvı için maksimum 1.442,6 K iken, % 0,01 hacim oranlı nano akışkan için 1.450,3 K ve %0,1 hacim oranlı nano akışkan için ise 1.466,3 K olarak elde edilmiştir. Nano metal oranı arttıkça, bağlı güç yoğunluğunun ortalama değeri de arttığı için, yakıt sıcaklığındaki artış öngörülebilir düzeyde gerçekleşmektedir. Safarzadeh ve ark. [17], yakıt merkezi sıcaklık değerlerini değişen hacim oranlarında nano akışkan için incelemişlerdir.



**Şekil 8.** Nanoakışkanın değişen hacim oranları için DNBR değerinin değişimi (DNBR value for varying volume ratios of nanofluid)

Şekil 8'de nano akışkanın değişen hacim oranlarına göre DNBR (Departure from Nucleate Boiling Ratio) değişimleri verilmiştir. 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 [25]. Nominal çalışma koşullarında beklenen minimum DNBR değeri 2,08'dir [26].

Kararlı durum çalışma koşulları altında 2,08' den az olmaması gereken DNBR oranı, bu çalışma kapsamında referans sıvı baz alındığında 4,158 olarak hesaplanırken, % 0,01 hacimli nano akışkanda ise en düşük değeri 4,115 ve % 0,1 hacim oranında ise 4,035 olarak bulunmuştur.

Her ne kadar baz alınan sıvı değerine göre bünyesinde nano akışkan bulunan soğutucunun DNBR değeri düşmüş olsa da, kritik eşik değeri olan 2,08'in altına inmediği için herhangi bir güvenlik zaafiyetine sebep olmamaktadır. Saadati ve ark. [15] yaptıkları çalışmada DNBR değeri için bu çalışmada elde edilen bulgulara benzer sonuçlar elde etmişlerdir.

#### 4. SONUÇLAR ( CONCLUSIONS)

Bu çalışmada, saf su ve saf su/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nano akışkan karışımını soğutucu akışkan olarak kullanan homojen dizilimli ve UO<sub>2</sub> yakıtlı VVER 1000 reaktöründe MCNP nötronik kodu yardımıyla bağlı güç yoğunlukları ve COBRA kodu ile de termal performans analizi yapılmıştır. Çalışma sonucunda baz sıvı kullanıldığında soğutucu sıcaklığının maksimum 604,2 K iken, %0,1 hacim oranlı Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> eklenmiş nano akışkanda maksimum soğutucu sıcaklığı 605,58 K'e ulaşmıştır. Aynı şekilde baz sıvı için entalpi değeri kanal sonunda 1.532,7 kJ/kg iken, %0,1 hacim oranlı Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> için 1.541,8 kJ/kg olarak bulunmuştur. Bir diğer önemli değer olan yakıt merkezi sıcaklığı ise, baz sıvı için 1.442,6 K iken, %0,1 hacim oranlı Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> için 1.466,3 K olarak elde edilmiştir. Çalışmanın en önemli sonuçlarından biri olan MDNBR (Minimum Departure from Nucleate Boiling Ratio) oranı ise, nominal çalışma koşullarında beklenen değeri 2,08 iken, baz sıvı kullanımında bu oran 4,158'e düşerken, %0,1 oranlı Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> için 4,035 değerine düşmüştür. Bütün elde edilen sonuçlar, eklenen nanoparçacık ile birlikte akışkanın ısı iletim oranının %0,23 oranında artabileceğini göstermiştir.

#### ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazar(lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

#### YAZARLARIN KATKILARI (AUTHORS' CONTRIBUTIONS)

**Sinem UZUN:** Termal analizleri yapmıştır.

**Yasin GENÇ:** Sonuçlarını analiz etmiştir.

**Adem ACIR:** Makalenin yazım işlemine katkıda bulunmuştur.

#### ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

[1] William J.Kinsella, "Extracting Uranium's futures: Nuclear wastes, toxic temporalities, and uncertain decisions ", *The Extractive Industries and Society*, Available online 8 February (2020).

- [2] Christophe Poinssot, Christine Rostaing, Pascal Baron, Dominique Warin, Bernard Boullis, "Main Results of the French Program on Partitioning of Minor Actinides, a Significant Improvement Towards Nuclear Waste Reduction", *Procedia Chemistry*, Volume 7, Pages 358-366, (2012)
- [3] The VVER Today, Evolution, Design, Safety, ROSATOM Overseas Report
- [4] Zarifi E., Jahanfarnia G., Veysi F., "Neutronic Simulation of water-based nanofluids as a coolant in VVER-1000 reactor", *Progress in Nuclear energy* (65),32-41, (2013).
- [5] Hadad K.,Hajizadeh A., Jafarpour K.,Ganapol B.D., "Neutronic study of nanofluids application to VVER-1000", *Annals of Nuclear Energy* (37),1447-1455,(2010).
- [6] Abuqudaira, T. M., Stogov, Y. V., "Neutronic calculations for the VVER-1000 LEU and MOX assembly computational benchmark using the GETERA code ", *Journal of Physics: Conference Series*, 1133: 1-10, (2018).
- [7] Louis, H. K., "Investigation of the Pin-By-Pin Fission Rate Distributions for VVER MOX and LEU Fuel Assemblies Using MCNPX Code", *International Journal of Science, Engineering and Technology Research (IJSETR)*, 5(9): 2926 – 2931, (2016).
- [8] OECD NEA, A VVER-1000 LEU and MOX Assembly Computational Benchmark: Specification and Results, (2002).
- [9] JitkaVojackova, Filip Novotny, Karel Katovsky," Safety analyses of reactor VVER 1000", *Energy Procedia*, 127,352-359 , September (2017).
- [10] Mohammed S.Dwidar, Alya A.Badawi, Hanaa H.Abou-Gabal, Ibrahim A.El-Osery, Investigation of different scenarios of thorium–uranium fuel distribution in the VVER-1200 first core, *Annals of Nuclear Energy*, 85, 605-612, November (2015).
- [11] Martin K., Boran K., "Isı borulu havadan havaya ısı değiştiricisinde CuO+Fe/Saf Su ve CuO/Saf su nano akışkanlarının kullanımının ısı performansına etkisinin incelenmesi", *Politeknik Dergisi*, \*(\*) : \*, (\*). (Erken Görünüm)
- [12] Akkaya M., Menlik T. and Sözen A., "Performance enhancement of a vapor compression cooling system: an application of POE/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>", *Journal of Polytechnic*, \*(\*) : \*, (\*). (Erken Görünüm)
- [13] Sayantan Mukherjee, Sayan Jana, PurnaChandra Mishra, Paritosh Chaudhuri, ShantaChakrabarty, "Experimental investigation on thermo-physical properties and subcooled flow boiling performance of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/water nanofluids in a horizontal tube", *International Journal of Thermal Sciences*, 159, (2021).
- [14] Zarifi E., Jahanfarnia G., Veysi F., "Thermal hydraulic modeling of nanofluids as the coolant in VVER-1000 reactor core by the porous media approach", *Annals of Nuclear Energy*, 51, 203-212, (2013).
- [15] Hassan Saadati, Kamal Hadad, Ataollah Rabiee, "Safety margin and fuel cycle period enhancements of VVER-1000 nuclear reactor using water/silver nanofluid", *Nuclear Engineering and Technology*, 50: 639-647,(2018).



- [16] F. Faghihi, S.M. Mirvakili, S. Safaei, S. Bagheri, "Neutronics and sub-channel thermal-hydraulics analysis of the Iranian VVER-1000 fuel bundle", *Progress in Nuclear Energy* 87: 39-46, (2016).
- [17] O. Safarzadeh, A.S. Shirani, A. Minucmehr, F. Saadatian," Coupled neutronic/thermo-hydraulic analysis of water/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanofluids in a VVER-1000 reactor", *Annals of Nuclear Energy* 65: 72–77, (2014).
- [18] COBRA-IV PC: A Personal Computer Version Of Cobra-Iv-I For Thermal-Hydraulic Analysis Of Rod Bundle Nuclear Fuel Elements And Cores, U.S. Department of Energy under Contract DE-AC06-76RLO 1830, B. Webb January, (1988).
- [19] X-5 Monte Carlo Team, 2005. MCNP-A General Monte Carlo N-Particle TransportCode, Version 5, vol. II: User's Guide, LA-CP-03-0245, Los Alamos National Laboratory.
- [20] Muhammad Arshad, "Study Of Xenon And Samarium Behaviour In The Leu PARR-1 Cores" Reactor Physics Group,Nuclear Engineering Division Pakistan Institute of Nuclear Science & Technology, October, (1994).
- [21] Elif Begüm ELÇİOĞLU, Almila GÜVENÇ YAZICIOĞLU,Sadık KAKAÇ," Nanoakışkan Viskozitesinin Karşılaştırmalı Değerlendirmesi", *Isı Bilimi ve Tekniği Dergisi*, 34, 1, 137-151,(2014).
- [22] Velagapudi, V., Konijeti, R.K., Aduru, C.S., Empirical correlation to predict thermophysical and heat transfer characteristics of nanofluids. *Therm. Sci.* 12(2): 27–37,(2008).
- [23] Maïga, S.E.B., Nguyen, C.T., Galanis, N., Roy, G., Heat transfer behaviours of nanofluids in a uniformly heated tube. *Superlattices Microst.* 35(3): 543–557,(2004).
- [24] Pak, B.C., Cho, Y.I., Hydrodynamic and heat transfer study of dispersed fluids with submicron metallic oxide particles. *Exp. Heat Transfer* 11(2): 151–170, (1998).
- [25] Seyed Mohammad Mousavizadeh, Gholam Reza Ansarifar, Mansour Talebi, "Assessment of the TiO<sub>2</sub>/water nanofluid effects on heat transfer characteristics in VVER-1000 nuclear reactor using CFD modeling", *Nuclear Engineering and Technology*, 47(7): 814-826 December (2015).
- [26] Westinghouse Technology Systems Manual Section 2.2, Power Distribution Limits