



POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

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

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



VVER-1000 nükleer güç reaktöründe kritiklik ve bağıl güç yoğunluk dağılımının incelenmesi

Investigation of criticality and relative power density distribution in VVER-1000 nuclear power reactor

Yazar(lar) (Author(s)): Yasin GENÇ¹, Sinem UZUN², Adem ACIR³

ORCID¹: 0000-0002-2786-4824

ORCID²: 0000-0002-2814-1062

ORCID³: 0000-0002-9856-3623

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article): 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).

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

DOI: 10.2339/politeknik.683658

VVER-1000 Nükleer Güç Reaktöründe Kritiklik ve Bağlı Güç Yoğunluk Dağılımının İncelenmesi

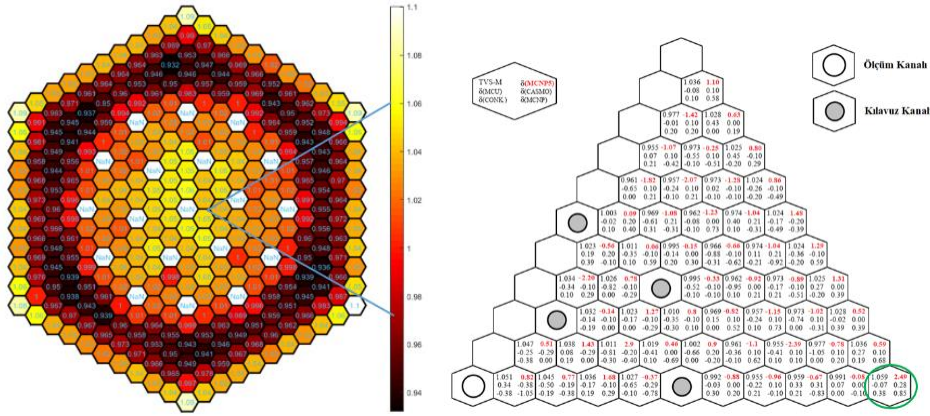
Investigation of Criticality and Relative Power Density Distribution in VVER-1000 Nuclear Power Reactor

Önemli noktalar (Highlights)

- ❖ VVER-1000
- ❖ MCNP
- ❖ keff
- ❖ güç yoğunluğu

Grafik Özet (Graphical Abstract)

VVER-1000 yakıt demeti için, her bir yakıt hücresindeki kritiklik ve bağlı güç dağılımı elde edilmiştir./ For the VVER-1000 fuel bundle, the criticality and relative power distribution in each fuel cell are obtained.



Şekil. Yakıt demeti 1 için (a) bağlı güç yoğunluk değeri, (b) diğer kodlar ile sapma yüzdelерinin karşılaştırılması / **Figure.** For fuel assembly 1 (a) relative power density value, (b) comparison of deviation percentages with other codes

Amaç (Aim)

Modellenen farklı yakıt demetlerinin, literatür ile doğruluğunun karşılaştırılması. / To compare the accuracy of the modeled fuel bundles with the literature.

Tasarım ve Yöntem (Design & Methodology)

MCNP nötronik kodu ile modelleme/ Modeling with MCNP neutronic code.

Özgünlük (Originality)

Reaktör korunda farklı yakıt modeli kullanımı./ Use of different fuel model in the reactor.

Bulgular (Findings)

En fazla sapma YD4 yakıt düzeninde, %4,54 değerinde olmuştur./ The maximum deviation was 4.54% in the YD4 fuel arrangement.

Sonuç (Conclusion)

VVER-1000 nükleer yakıt demeti MCNP modellemelerinin doğruluğu ispatlanmıştır. / MCNP modeling of VVER-1000 nuclear fuel bundle has been proven to be correct.

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 Nükleer Güç Reaktöründe Kritiklik ve Bağlı Güç Yoğunluk Dağılımının İncelenmesi

Araştırma Makalesi / Research Article

Yasin GENÇ¹, Sinem UZUN^{1,2,*}, Adem ACIR¹

¹Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Teknikokullar- Yenimahalle/ANKARA

²Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Yalnızbağ Kampüsü/ERZİNCAN

(Geliş/Received : 03.10.2019 ; Kabul/Accepted : 11.12.2019)

ÖZ

Nükleer güç reaktörlerinin tasarımının ve güvenle çalışmasının en önemli öğelerinden biri, kritiklik ve bağlı güç yoğunluk dağılımının incelenmesidir. Bu çalışmada VVER-1000'in kritiklik ve bağlı güç yoğunluk dağılımını içeren nötronik performans analizleri MCNP nötronik kod yardımıyla hesaplanmıştır. Dört farklı yakıt tipi için nötronik hesaplamalar gerçekleştirilmiştir. Her bir yakıt demeti için yapılan hesaplamalar sonucunda reaktör korunda kritiklik ve bağlı güç yoğunluk dağılımları elde edilmiştir. Bu çalışmada elde edilen sonuçlar literatürle karşılaştırılmış ve elde edilen kritiklik ve bağlı güç yoğunluk dağılımı değerlerinin birbirleriyle benzerlik gösterdiği görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: VVER-1000, MCNP, keff, güç yoğunluğu.

Investigation of Criticality and Relative Power Density Distribution in VVER-1000 Nuclear Power Reactor

ABSTRACT

One of the most important elements of the design and safe operation of nuclear power reactors is the examination of the criticality and relative power density distribution. In this study, the neutronic performance analysis of the VVER-1000 containing the critical and relative power density distribution was calculated with the help of the MCNP neutronic code. Neutronic calculations were performed for four different fuel types. As a result of the calculations for each fuel assembly, criticality and relative power density distributions were obtained in the reactor core. The results obtained in this study were compared with the literature and it was seen that the critical and relative power density distribution values were similar.

Keywords: VVER-1000, MCNP, keff, power density.

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 reaksiyonlarından birisi de VVER nükleer reaktörleridir. VVER bir tür basınçlı su reaktörü olup geleneksel ticari basınçlı su reaktörü ile bazı benzerlikleri ve farklılıkları bulunmaktadır. 3+ nesil nükleer reaktörler olarak tanımlanan VVER-1000 ve VVER-1200 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. Yapılan çalışmalarda uluslararası Nükleer Enerji Ajansı (NEA) tarafından paylaşılan reaktör parametrelerine bağlı olarak farklı

araştırmacılar tarafından modelleme yapılmakta ve kullanılması planlanan bilgisayar programları ile nükleer veri kütüphanelerinin uygunluğu ve doğruluğunun test edilmesi mümkün olabilmektedir [3,4]. Literatürde yer alan çalışmalardan bir kısmı bu bölümde tanımlanmıştır. Lazarenko vd. tarafından yapılan çalışmada uranyum ve MOX yakıtı kullanılarak farklı nötronik kodlar yardımıyla farklı nötronik kütüphaneler kullanılarak reaktör kritiklik değerleri, yanma oranları ve her bir yakıt elemanı için fisyon oranı dağılımı hesaplamaları yapılmıştır.

Lazarenko vd. tarafından yapılan bu çalışma ile farklı MCU, APOLLO-2, TVS-M, WIMS8A, HELIOS ve MCNP4B nötronik kodlar arasındaki elde edilen sonuçlardaki sapma değerleri %2'yi ve %3'ü aşmayan aralıkta gözlemlenmiştir [5,6]. Marcatali vd. [7] tarafından VVER-1000 basınçlı su reaktörünün yakıt demetinin 1/6'sı için SERPENT ve SCALE kodları ile modern nükleer veri kütüphaneleri kullanılarak görelî güç dağılımı değerleri hesaplanmış ve elde edilen sonuçların birbirleri arasında kıyaslaması yapılmıştır. Etkin çoğaltma faktörü hesabında kodlar arasında gözlemlenen en büyük sapma değeri %1'in altında iken

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)
e-posta : sinemuzun@erzincan.edu.tr

görelî güç dağılımında maksimum sapmanın % 4,2'yi bulduğu ortaya konmuştur. Gordienko vd. [8] AER VVER-1000-ETE için nötron transport hesaplamalarını BIPR-8 programı ile gerçekleştirmiş ve hesaplamada tam kor geometrisi dikkate alınmış, her bir yakıt hücresi için güç dağılım hesabı yapılmış ve elde edilen sonuçlar MCNP sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Tam kor çalışmalarında sapma değeri %1,37'yi geçmez iken tüm yakıt elemanı tek tek değerlendirildiğinde en yüksek görelî hata değeri %5,1 olarak hesaplanmıştır. Thilagam vd [9] NEA tarafından referans olarak gösterilen düşük zenginlikte uranyum ve karma yakıt düzenine sahip bir VVER-1000'in her bir yakıt hücresi için nötronik davranışı tahmin etmeyi hedeflemiştir. Bu çalışmada WIMS-D 172 enerji gruplu "JEFF31GX" tesir kesiti kütüphanesini kullanılarak ve hücre temelli hesap yapabilen EXCEL kodu geliştirilmiş ve hesaplamalarda kullanılmıştır. Hesaplamalardan elde edilen sonuçlar literatürde verilen sonuçlarla karşılaştırılmış ve fisyon oranı dağılımlarının Gadolinium içermeyen yakıt hücrelerinde literatüre göre %2 oranında sapma gösterdiği, ancak Gadolinium ihtiva eden hem düşük zenginlikteki hem de karma yakıt düzenine sahip yakıt hücrelerinde ise bu sapma oranının %5 mertebesine çıktığı görülmüştür. Abuqudaira ve Stogov [3], çarpışma olasılıkları yöntemini esas alan GETERA kodunu kullanarak nötronik analizini gerçekleştirmiş ve elde edilen sonuçlar literatürde sunulan BNAB-93 nükleer veri kütüphanesini kullanan GETERA kodu yardımıyla elde edilen sonuçlarla kıyaslanmış ve sapmanın %0,7'den düşük olduğu hesaplanmıştır. Veen vd. monte carlo hespalam yöntemi yardımıyla nükleer reaktörlerde yakıt demetlerinde oluşan güç dağılımlarının düzgünleştirilmesine yönelik bir çalışma yapmışlardır[10].

Bu çalışmada ise VVER-1000 yakıt demeti için MCNP [11] nükleer kodu yardımıyla her bir yakıt hücresindeki reaktör kritiklik değerleri, enerji birikim değerleri ve bağıl güç dağılımları elde edilmiştir. VVER-1000 yakıt demeti için elde edilen bu çalışmadaki değerler, literatürde verilen değerle kıyaslanarak karşılaştırılmış ve yapılan çalışmadaki reaktör modellemesinin doğruluğu test edilmiş ve bundan sonra yapılacak çalışmalara kaynak olması hedeflenmiştir.

2. REAKTÖR GEOMETRİSİ (REACTOR GEOMETRY)

VVER-1000/1200 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 [12]. Bu çalışmada incelenen VVER-1000 yakıt demetinin geometrik özellikleri Çizelge 1'de verilmiştir.

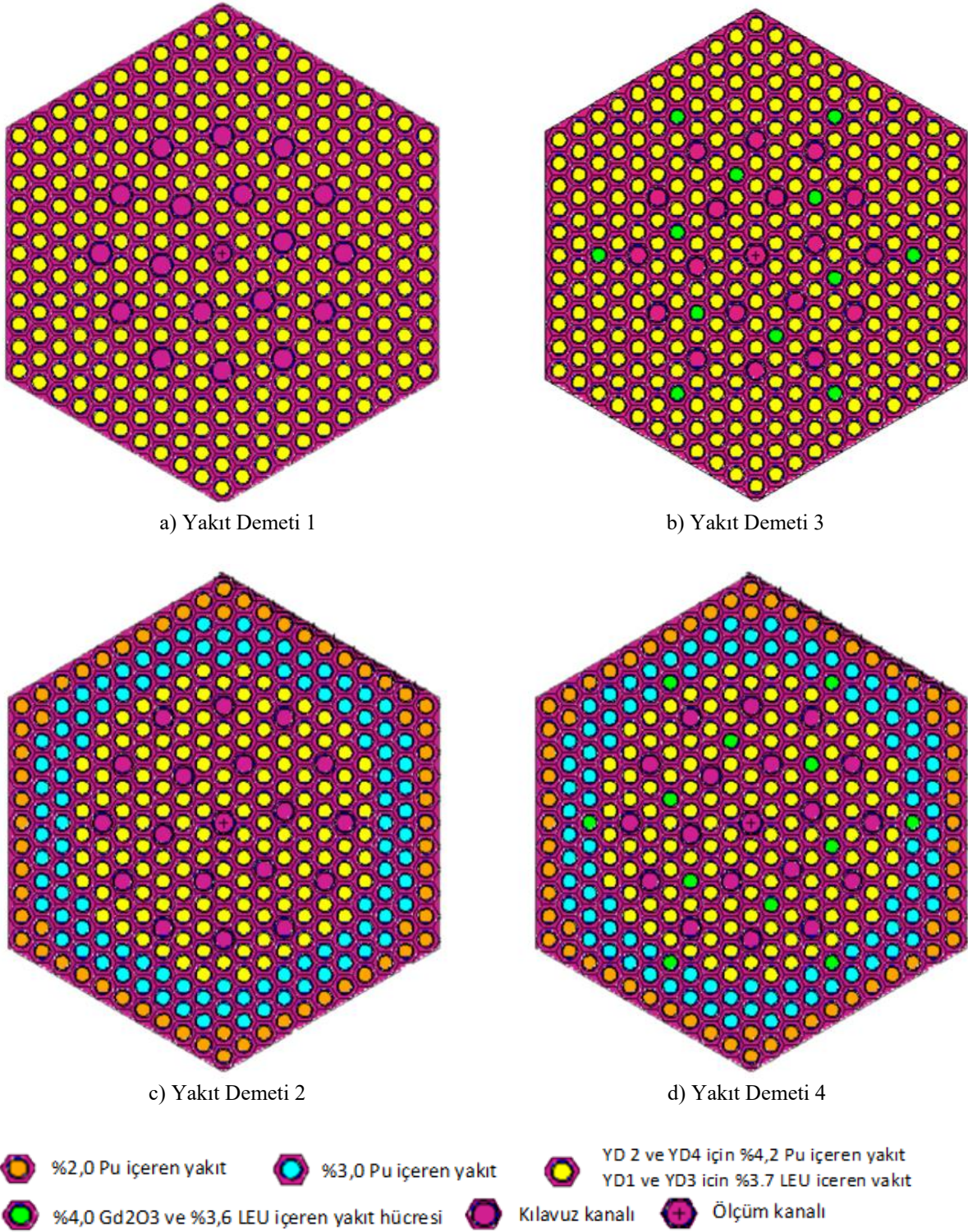
Çizelge 1. VVER-1000 genel karakteristik özellikleri (General characteristics of VVER-1000) [13,14]

Yakıt Demeti	
Örgü türü (lattice type)	Altıgen
Kordaki yakıt demeti sayısı	163
Yakıt demetleri arasındaki mesafe	23,6
Her bir yakıt demetine yüklenen 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, MOX, UGD, MOXGD
Zarf malzemesi	%98,97 Zr, %1 Nb, %0,03 Hf
Yakıt çubukları arasındaki mesafe (mm)	12,75
Kılavuz tüpü	
Her bir yakıt demetinde yer alan kılavuz tüpü sayısı	18
İç çapı / Dış çapı (mm)	10,9 / 12,6 mm

Çizelge 1 de verilen VVER-1000 nükleer reaktör geometrik özellikleri kullanılarak reaktörün Şekil 1'de gösterildiği gibi MCNP [15] nötronik kod yardımıyla farklı yakıt tip ve oranlarını içeren reaktör yakıt demeti modellenmiştir. VVER nükleer reaktöründe kullanılan yakıt pelleti malzemeleri Low Enriched Uranium (LEU), Mixed Oxide Fuel (MOX), Uranium Gadolinium (UGD), Mixed Oxide Gadolinium Fuel (MOXGD) olarak Çizelge 1'de verilmiştir. Şekil 1'de gösterildiği gibi yakıt demeti (YD) dört farklı şekilde tanımlanmıştır.

Homojen %3,7 düşük zenginlikli uranyum ile (LEU) birlikte YD1, farklı oranlarda %2, %3, %4,2 ²³⁹Pu içeren YD3, homojen %3,7 LEU ve %3,6 LEU ile %4 Gd₂O₃ içeren YD2 ve %2, %3, %4,2 ²³⁹Pu ve %3,6 LEU ile %4 Gd₂O₃ içeren YD4 reaktör yakıt demeti modelleri için MCNP nükleer kodu yardımıyla çözümlenmeler yapılmıştır.

Bu çalışmada, Şekil 1'de belirtilen dört farklı yakıt demeti düzeni için MCNP girdi dosyaları oluşturulmuş ve endf66 nükleer veri kütüphanesi kullanılarak reaktörün nötronik analizi kritiklik, enerji birikim değerleri ve bağıl güç dağılımları incelenmiş ve Ref [5] ile bu modelleme sonuçları kıyaslanmıştır



Şekil 1. Yakıt demeti düzeni a) YD1 (Homojen %3,7 LEU) b) YD3 (%2, %3, %4,2 Pu) c) YD3 (Homojen %3,7 LEU ve %3,6 LEU ile %4 Gd₂O₃) d) YD4 (%2, %3, %4,2 Pu ve %3,6 LEU ile %4 Gd₂O₃) (Fuel assembly layout a) YD1 (Homojen %3,7 LEU) b) YD3 (%2, %3, %4,2 Pu) c) YD3 (Homojen %3,7 LEU and %3,6 LEU with %4 Gd₂O₃) d) YD4 (%2, %3, %4,2 Pu and %3,6 LEU with %4 Gd₂O₃)

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 ve soğutucu sıcaklık katsayısının negatif olmasına teminen soğutucu içerisinde 600 ppm'lik bor konsantrasyonu eklenerek gerçekleştirilmiştir. Ayrıca analizlerde soğutucu bünyesinde Ksenon (Xe) ve Samaryum (Sm) konsantrasyonunun bulunmadığı varsayılmıştır.

3. NÜMERİK SONUÇLAR (NUMERICAL RESULTS)

3.1. Kritiklik (k_{eff}) (Criticality)

Nükleer reaktörlerde kritiklik değeri (k_{eff}) bir "1" değerinin üzerinde olması gerekir ve bu durum reaktörün çalışabilmesi için oldukça önemlidir. Yapılan bu çalışmada VVER 1000 reaktörünün YD1, YD2, YD3 ve YD4 nötronik modellemeleri için hesaplanmıştır.

Hesaplama sonucunda elde edilen kritiklik değerleri literatürde verilen farklı nötronik hesaplama kodları ile elde edilmiş değerlerle Çizelge 2'de görüldüğü gibi karşılaştırılmıştır. Bu çalışma elde edilen sonuçlar YD1, YD2, YD3 ve YD4 nötronik modellemeleri için elde edilen sonuçlar Çizelge 2'de görüldüğü gibi uyum sağladığı görülmüştür. Çizelge 2'de verilen literatürde yapılan çalışmalar sonucu elde edilen kritiklik değerlerinin ortalaması alınmış ve yapılan bu çalışma ile hata miktarı ortalamadan sapma olarak belirlenmiştir. Bu çalışmada elde edilen sonuçlar YD1, YD2, YD3 ve YD4 modellemeleri için Ref. [5]'de literatürde elde edilen sonuçlara göre sırasıyla %1,89, %2,78, %2,55 ve %2,91 sapma gösterdiği tespit edilmiştir. Bu çalışmada elde edilen sonuçların sapma değeri ile kıyaslandığında hesaplanan k_{eff} değerlerinin Çizelge 1'de görüldüğü gibi literatürde verilen kritiklik değerleri ile uyum içerisinde olduğu anlaşılmıştır.

Çizelge 2. Bu çalışmadaki kritiklik değerlerinin Ref. [5]'de verilen değerlerle karşılaştırılması (Comparison values of critical values in this study with the values given in Ref.[5])

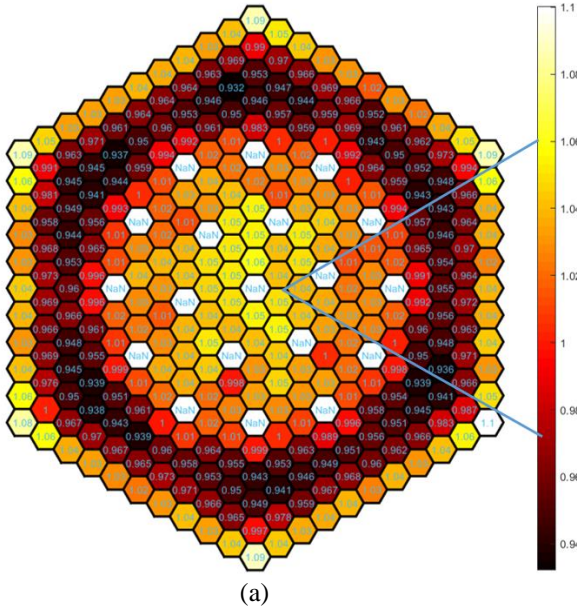
	MCNP (Bu çalışma)	APOLLO-2	TVS-M	MCU- REA	CONKEMO	COSMO-4	KENO	MCNP4-B
YD1	1,31404	1,2939	1,2858	1,2865	1,2944	1,2843	1,2911	1,2918
YD2	1,28164	1,2481	1,2501	1,2426	1,2429	1,2523	1,2453	1,2478
YD3	1,20840	1,1804	1,1774	1,1757	1,1786		1,1783	1,1800
YD4	1,22478	1,1918	1,1949	1,1877	1,1845		1,1896	1,1922

3.2. Bağlı Güç Yoğunluğu Dağılımı (Relative Power Density Distributions)

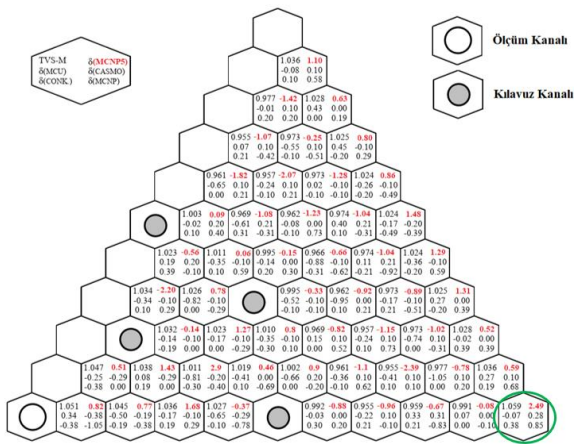
Nükleer reaktörlerde bağlı güç yoğunluğu dağılımı fisyon reaksiyonlarına bağlı olarak değişmektedir. Başka bir anlatımla güç yoğunluğu dağılımı reaktör yakıt demetinde meydana gelen fisyon yoğunluğu ile orantılıdır. Fisyon enerjisi nükleer reaksiyon açığa çıkmakta ve bir fisyon reaksiyonu sonucunda 200 MeV enerji açığa çıkmaktadır. Bu fisyon enerjisinin büyük bir bölümü kinetik enerji olarak açığa çıkmaktadır [15]. 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 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 kesitlerine

absorbsiyon oranları $\sigma_{f,th}(^{239}\text{Pu}) = 742.5$ b ve $\sigma_{f,th}(^{241}\text{Pu}) = 1009$ b iken buna karşılık gelen $\sigma_{f,th}(^{235}\text{U}) = 583.5$ b olmasıdır.

Yukarıda açıklandığı gibi bağlı güç yoğunlukları, fisyon reaksiyonlarına bağlı olarak değişmektedir. Bu çalışmada, VVER 1000 nükleer reaktör koru MCNP nükleer kodu yardımıyla modellenmiş ve belirlenen yakıt türlerine göre analiz edilmiştir. Yapılan bu çalışmada VVER 1000 reaktörünün YD1, YD2, YD3 ve YD4 nükleer yakıtları kullanılarak modellenen reaktör korunda oluşan bağlı güç yoğunluk dağılımları elde edilmiştir.



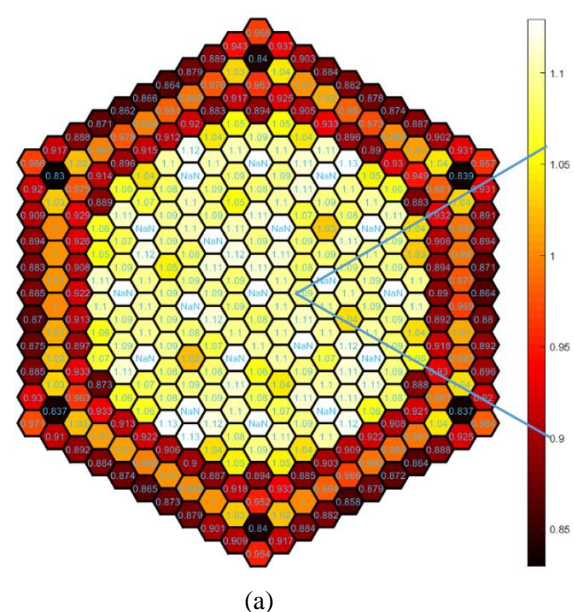
(a)



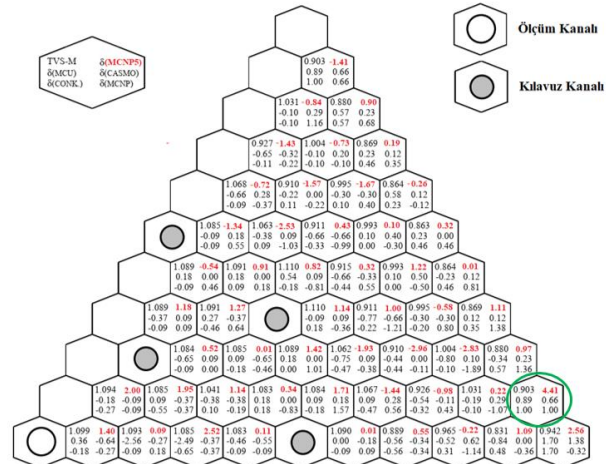
(b)

Şekil 2. Yakıt demeti 1 için (a) bağıl güç yoğunluk değeri, (b) diğer kodlar ile sapma yüzdelerinin karşılaştırılması (For fuel assembly 1 (a) relative power density value, (b) comparison of deviation percentages with other codes)

Şekil 2 (a)' de verilen reaktör yakıt demeti üzerinde oluşan güç yoğunlukları YD1 yakıt türüne bağlı olarak modellenmiş ve Şekil 2 (b)'de literatürde elde edilen sonuçlarla yapılan bu çalışma karşılaştırılmıştır. Şekil 2 (b) incelendiğinde bu çalışmada elde edilen güç yoğunluğu sonuçları ile Ref. [5]'de verilen TVS-M kodunun sonuçları ile karşılaştırıldığında, sonuçlar arasında sapma yakıt düzeni için %2,49 (yeşil halka ile gösterilen hücre) ile yakıt demeti düzeneğinin en dış katmanındaki hücrede tespit edilmiştir.



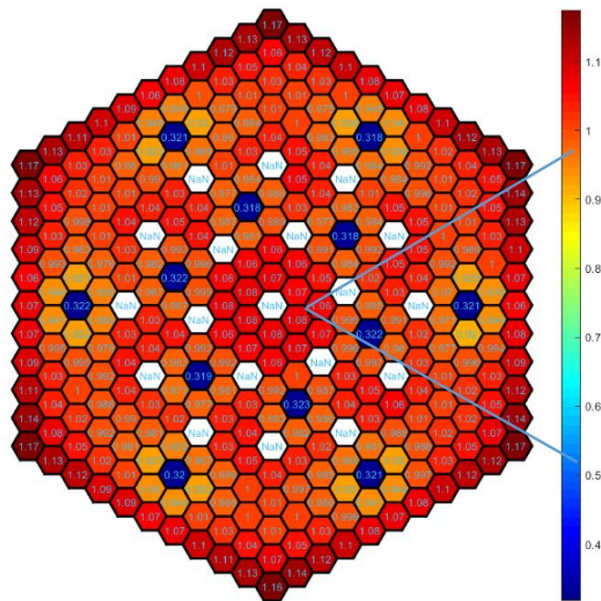
(a)



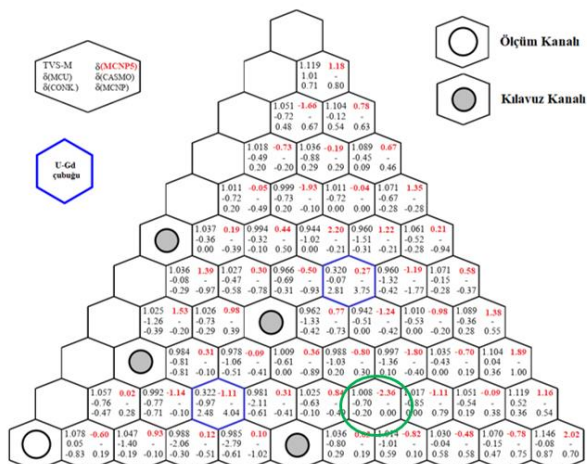
(b)

Şekil 3. Yakıt demeti 2 için (a) bağıl güç yoğunluk değeri, (b) diğer kodlar ile sapma yüzdelerinin karşılaştırılması (For fuel assembly 2 (a) relative power density value, (b) comparison of deviation percentages with other codes)

Şekil 3 (a)' de verilen YD2 yakıt türüne bağlı olarak modellenmiş reaktör yakıt demeti üzerinde oluşan güç yoğunlukları ve Şekil 3 (b)'de literatürde elde edilen sonuçlarla bu çalışma sonuçları verilmiştir. Şekil 3 (b) incelendiğinde bu çalışmada elde edilen güç yoğunluğu sonuçları ile Ref. [5]'de verilen sonuçlar karşılaştırıldığında, elde edilen sonuçlardaki sapma değeri % 4,41(yeşil halka ile gösterilen hücre) ile yakıt demeti düzeneğinin en dıştan ikinci katmanındaki hücrede gerçekleşmiştir.



(a)

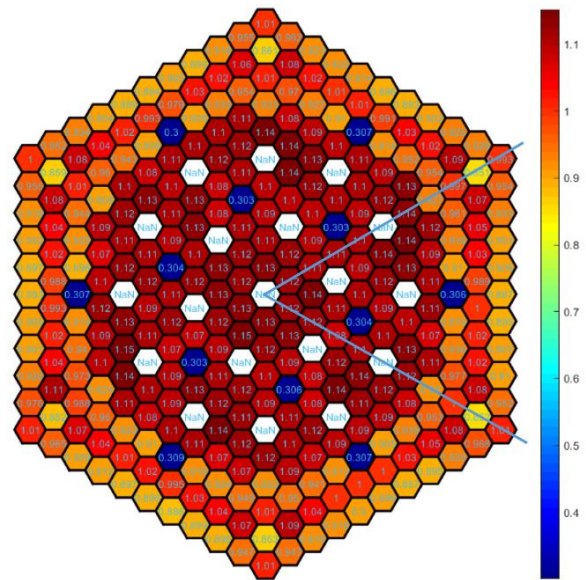


(b)

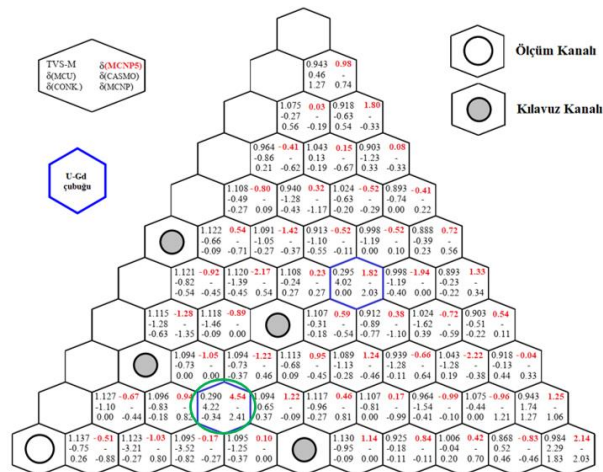
Şekil 4. Yakıt demeti 3 için (a) bağlı güç yoğunluk değeri, (b) diğer kodlar ile sapma yüzdelerinin karşılaştırılması (For fuel assembly 3 (a) relative power density value, (b) comparison of deviation percentages with other codes)

Şekil 4 (a)' de verilen YD3 yakıt türüne bağlı olarak modellenmiş reaktör yakıt demeti üzerinde oluşan güç yoğunlukları ve Şekil 4 (b)'de literatürde elde edilen sonuçlarla bu çalışma sonuçları verilmiştir. Şekil 4(b)'de sunulan Ref. [5] ile verilen diğer nükleer kodların çıktıkları bu çalışma ile irdelendiğinde, TVS-M koduna göre MCU kodunun sonuçlarında gözlenen görelî sapma değeri %-2,79 iken, CONCK kodunun çıktılarına göre ise görelî sapma değeri %2,81 olarak hesaplanmıştır. Şekil 4(b)' de yer alan sonuçlara göre, bu çalışmada elde edilen sonuçlar ile TVS-M kodu sonuçları kıyaslanmış ve görelî sapma değeri %-2,36 (yeşil halka ile gösterilen hücre)

olarak hesaplanmıştır. Ayrıntılı olarak farklı kodların sonuçlarının sunulduğu Şekil 4 (b)'de gözlemlenen en yüksek sapma değerleri her ne kadar yakıt demetinin farklı yakıt hücrelerinde tespit edilse de bu çalışmada gözlemlenen bu sapma değerleri kabul edilebilir sınırlar dâhilinde kaldığı gözlenmiştir.



(a)



(b)

Şekil 5. Yakıt demeti 4 için (a) bağlı güç yoğunluk değeri, (b) diğer kodlar ile sapma yüzdelerinin karşılaştırılması (For fuel assembly 4 (a) relative power density value, (b) comparison of deviation percentages with other codes)

Şekil 5 (a)' de verilen YD4 yakıt türüne bağlı olarak modellenmiş reaktör yakıt demeti üzerinde oluşan güç yoğunlukları ve Şekil 5 (b)'de literatürde elde edilen sonuçlarla bu çalışma sonuçları verilmiştir. Şekil 5(b)' de sunulan sonuçlara göre, Ref. [5] yer alan MCU kodunun

sonuçlarının TVS-M kodunun sonuçları ile kıyaslandığında görelî sapma değeri %4,22 olduğu belirtilmiştir. Şekil 5'te yeşil halka ile gözlemlenen en yüksek sapma değerine sahip hücre işaretlenmiş olup bu çalışmada maksimum sapma değeri %4,54 (yeşil halka ile gösterilen hücre) olarak hesaplanmıştır. Bu değer ise bu çalışmada analizleri gerçekleştirilen dört farklı yakıt demetinin sonuçları arasında görülen en yüksek görelî sapma değeridir. Bu çalışmada saptanan maksimum görelî sapma değeri Marcatali vd. [7], Gordienko vd. [8] ve benzeri açık literatürdeki diğer çalışmalarla karşılaştırıldığında kabul edilebilir hata payları olduğu görülmüştür.

Elde edilen güç yoğunluk dağılım değerleri Ref. [5] ile genel olarak karşılaştırıldığında, dört farklı yakıt düzeni için güç yoğunluklarında ki görelî sapma değerleri incelendiğinde, en az sapmanın %2.36 oran ile YD3 (Homojen %3,7 LEU ve %3,6 LEU ile %4 Gd₂O₃) yakıt düzeninde, en çok sapmanın ise YD4 (%2, %3, %4,2 Pu ve %3,6 LEU ile %4 Gd₂O₃) yakıt düzeni için %4,54 oranla gerçekleştiği görülmüştür.

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada; VVER-1000 güç reaktörünün boyutlarına sahip dört farklı yakıt demeti modellemesinin nötronik performans etkisi MCNP programı ve ENDF/B-VI nükleer veri kütüphanesi kullanılarak incelenmiştir. Her bir yakıt düzeninde yer alan farklı yakıtlar için etkin kritiklik değeri ve bağıl güç yoğunluk dağılımları hesaplanmış ve elde edilen sonuçlar literatürde verilen sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Bu çalışma ile elde edilen sonuçların, literatürde verilen sonuçlarla benzerlik gösterdiği ve uyum sağladığı görülmüştür. Karşılaştırmalardaki sapma değerleri bütün yakıt hücreleri için gerçekleştirilmiş olup, her yakıt demeti modellemesinde sapmalar meydana geldiği ancak maksimum sapma değeri %4,54 olarak YD4'de hesaplanmıştır. Çalışmada görülen bu sapmaların, referans problemde yakıt demetinin 1/6'sı için hesaplama yapılırken bu çalışmada gerçek boyutlardaki tam yakıt demeti için hesaplama yapılmasından ve kullanılan nükleer veri kütüphanesinin farklı olmasından kaynaklandığı sonucuna varılmıştır. Bu çalışmada elde edilen bu sonuçların literatürle uyum sağlaması sonucunda, bu çalışmada gerçekleştirilen VVER-1000 nükleer yakıt demeti MCNP modellemelerinin doğruluğu tespit edilmiştir.

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.

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, In Press

- [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*, 7: 358-366,(2012)
- [3] 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).
- [4] 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)
- [5] OECD NEA, A VVER-1000 LEU and MOX Assembly Computational Benchmark: Specification and Results, (2002)
- [6] Lazarenko, A., Kalugin, M., Bychkov, S., "Benchmark Calculations for VVER-1000 Fuel Assemblies Using Uranium or MOX Fuel" *Institute of Energy and Nuclear Research*, www.ipen.br/biblioteca/cd/physor/2000/physor/144.pdf
- [7] Marcatali, L., Venturini, A., Daeubler, M., Sanchez, V. H., "SCALE and SERPENT solutions of the OECD VVER-1000 LEU and MOX burnup computational benchmark" *Annals of Nuclear Energy*, 83: 328–341, (2015)
- [8] Gordienko, P. V., Kiryukhin, P. K., Shcherbakov, A. A., "Benchmark calculation AER VVER-1000 - ETE using BIPR8", *IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series*, 1133: 1-14, (2018)
- [9] Thilagam, L., Sunny, S. C., Jagannathan, V., Subbaiah, K. V., "A VVER-1000 LEU and MOX assembly computational benchmark analysis using the lattice burnup code EXCEL", *Annals of Nuclear Energy*, 36(4): 505–519, (2009).
- [10] Derk Van Veen, Jan Eduard Hoogenboom, "Efficiency Improvement of Local Power Estimation in the General Purpose Monte Carlo Code MCNP", *Progress in Nuclear Science and Technology*, 2: 866-871. (2011)
- [11] Briesmeister J.F., A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 4B, LA-13709M, *Los Alamos National Laboratory*, MCNP, (2000)
- [12] Manuel Garcia, Diego Ferraro, Ville Valtavirta, Riku Tuominen, Uwe Imke, Jaakko Leppanen, Victor Sanchez-Espinoza, "Serpent2-SUBCHANFLOW pin-by-pin modelling capabilities for VVER geometries", *Annals of Nuclear Energy*, 135: 106955 ,(2020)
- [13] 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)
- [14] Tooraj Nazari, Ataollah Rabiee, Hossein Kazeminejad, "Numerical investigation of the modal characteristics for a VVER-1000 fuel assembly", *Nuclear Engineering and Design*, 345: 1-6 (2019)
- [15] Snoj, L., Ravnik, M., "Calculation of Power Density with MCNP in TRIGA Reactor", *Proceedings of the International Conference Nuclear Energy for New Europe*, 1091-1096, (2006)