



## GADOLİNYUM OKSİTLİ VE BOR NİTRÜR KAPLI NÜKLEER YAKITLARIN PERFORMANS HESAPLARI

E. TANKER<sup>1</sup>, İ. USLU<sup>1</sup>, H. DIŞBUDAK<sup>1</sup>, G. GÜNDÜZ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Türkiye Atom Enerjisi Kurumu, Ankara

<sup>2</sup>Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara

### ÖZET

Doğal uranyum dioksit - gadolinyum oksit karışımı yakıt çubukları ile bor nitür kaplı düşük zenginlikli normal yakıtların, basınçlı su reaktöründe kullanılmaları durumundaki performansları karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Ona bir oranında yanabilir zehirli yakıt çubuğu bulduran yakıt demeti WIMS bilgisayar programıyla modellenerek yanmaya bağlı kritiklik, fisil izotop miktarları ve iki boyutlu güç dağılımları elde edilmiştir. Hesaplar %5 ve %10 gadolinyum oksit içeren yakıtlar ile 1 $\mu$ , 5 $\mu$  ve 10 $\mu$  bor nitür kaplanmış yakıtlar için yapılmıştır.

Bor nitür'le kaplama; bu yakıtların kritikliği gadolinyum oksit bulduranlara göre daha düzgün değiştiğinden; güç tepeleri daha düşük değerlerde olduğundan; öte yanda fisil izotop miktarlarında da önemli bir fark bulunmadığından; daha uygun görülmektedir.

### ABSTRACT

A comparative study was performed on the behavior of natural uranium dioxide - gadolinium oxide mixture fuel and boron nitride coated low enriched fuel in a pressurized water reactor. A fuel element containing one burnable poison fuel pin per ten ordinary fuel pins was modeled with the computer code WIMS, and burn-up dependent criticality, fissile isotope inventory and two dimensional power distribution were obtained. Calculations were performed for burnable poison fuels containing 5% & 10% gadolinium oxide and for those coated with 1 $\mu$ , 5 $\mu$  & 10 $\mu$  of boron nitride.

Boron nitride coating was found superior to gadolinium oxide on account of its smoother criticality curve, lower power peaks and insignificant change in fissile isotope content.

## GİRİŞ

Nükleer reaktörlerin kalp-içi yakıt yönetiminde, reaktör basınç kabının maruz kaldığı nötron akısını azaltmak ve dolayısıyla ömrünü artırmak amacıyla, taze yakıtların basınç kabının duvarına değil merkezine yakın olarak yüklenmesi yöntemi benimsenmektedir. Bu durumda taze yakıt demetlerinde oluşan güç tepe değerleri, kalbin bütünsel güç dağılımının da katkısıyla yükselmektedir. Bu tepeleri gidermek için taze yakıtlara yanabilir zehirler eklenmektedir. Zehirin miktarı ilk çevrim sonunda tamamıyla tükenmiş denilebilecek şekilde seçilmektedir. Önceleri borosilikat camı çubuklarının kontrol çubukları için ayrılmış tüplere konulması yöntemi uygulanırken sonraları gadolinyum oksit (Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) doğal veya çok düşük zenginlikli uranyum dioksitle (UO<sub>2</sub>) karıştırılmasıyla elde edilen yakıtların, normal zenginlikteki yakıtlar yerine (bir demette yaklaşık 1/10 oranında) kullanılması yeğlenmiştir. Son yıllarda da, normal zenginlikteki yakıtların zirkonyum diborit (ZrB<sub>2</sub>), bor nitrür (BN) ve bor karbür (B<sub>4</sub>C) ile kaplanması yöntemi geliştirilmektedir.

Bu çalışmada, bir yanda doğal uranyum dioksit - gadolinyum oksit karışımı yakıt çubuklarının, diğer yanda da bor nitrür kaplı normal yakıtların, düşük zenginlikli normal yakıtla birlikte basınçlı su reaktöründe (PWR) kullanılmaları durumundaki performansları karşılaştırmalı olarak incelenmiştir.

## VARSAYIMLAR

Standart bir PWR 17 × 17 yakıt demetinin 21.5 cm adımıda sonsuz bir örgü içinde yer aldığı varsayılmıştır. Demet merkezinde nötron algılayıcı (dedektör) veya nötron kaynağı için bir boş tüp, ayrıca kontrol çubukları için de 24 adet boş tüp bulunmaktadır. 264 adet yakıt çubuğunun 240 adedi, %4 zenginlikli UO<sub>2</sub>'dir. Geriye kalan 24 yakıt çubuğu, analiz gereğine göre, %4 zenginlikli UO<sub>2</sub> yakıt, doğal UO<sub>2</sub>-Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub> veya BN kaplı %4 zenginlikli UO<sub>2</sub> yakıt içermekte olup demete simetrik olarak yerleştirilmiştir (1/8 yakıt demetindeki yerleşim için bkz. Şekil 5). Hafifsu yavaşlatıcıda başlangıçta 1450 ppm borik asit (H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub>) bulunmakta olup, miktarı yanma ile doğrusal olarak azalarak 24 MWd/kgAE (başlangıçtaki ağır elementlerin - burada yalnızca uranyum izotopları- kilogramı başına megawat-gün) değerinde sifra inmektedir. Hesaplar da bu yanma değerinde sona erdirilmiştir.

## HESAPLAMALAR

Yukarıda anlatılan yakıt demeti WIMS bilgisayar programında modellenerek yakılmıştır. Normal yakıt, yanabilir zehir içeren yakıt ve demetin geri kalanı için olmak üzere üç değişik birim hücre kullanılmıştır. Hücre içi çarpışma olasılıkları normal yakıt için Bonalumi-Jonsson-Clayton (standart WIMS) yöntemiyle, yanabilir zehir içeren yakıt için ise, BN kaplamanın kalınlığının mikron düzeyinde olduğu dikkate alınarak, Carlvik yöntemiyle hesaplanmıştır [1]. Demetin geri kalanını temsil eden hücre homojen varsayılmıştır. Bir birim hücreden çıkan nötronların diğer bir birim hücreye (kendisi de olabilir) girme olasılıkları, değişik birim hücrelerin ortak yüzlerinden geometrik olarak hesaplanmış ve bütün enerji gruplarında aynı varsayılmıştır. Bu modelle bulunan akılar kullanılarak ve yanma adımları 0.15, 0.35, 0.50, 1.00 ve geri kalanı 2.00 MWd/kgAE olacak şekilde yanma tamamlanmıştır. 0, 12 ve 24 MWd/kgAE noktalarında her birim hücre homojenleştirilerek ve 6 enerji grubuna indirgenerek yakıt demetinin iki boyutlu XY modeli hazırlanmış ve güç dağılımları hesaplanmıştır. Hesaplar %5 ve %10 Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub> içeren yakıtlar ile 1μ, 5μ ve 10μ BN kaplanmış yakıtlar için yinelenmiştir.

## SONUÇLAR

Yanmaya karşı  $k_{\infty}$  değerleri Şekil 1'de gösterilmiştir.  $Gd_2O_3$  içeren yakıtların  $k_{\infty}$  eğrisi büyük salınım gösterirken BN kaplı yakıtların eğrileri normal yakıtinkine benzer olarak çok daha düzgündür. Ayrıca, gadolinyum bor'dan daha önce tükenmektedir (bkz. Şekil 2). Bu davranış farkı  $Gd^{155}$  ve  $Gd^{157}$  izotoplarının  $B^{10}$  izotopuna göre çok daha fazla nötron yutucu olmasından kaynaklanmaktadır ( $\sigma_a$  sırasıyla 60000 b, 250000 b ve 3800 b).

Yanmaya karşı demette kalan  $U^{235}$  miktarı Şekil 3'de ve oluşan fisil Pu ( $Pu^{239}$  ve  $Pu^{241}$ ) miktarları da Şekil 4'te gösterilmiştir.  $U^{235}$  miktarı demette bulunan zehirden az etkilenmekte, fisil Pu ise  $Gd_2O_3$  içeren yakıtlarda BN kaplı yakıtlara oranla biraz daha fazla oluşmaktadır. Bunun nedeni,  $Gd_2O_3$  içeren yakıtlardaki doğal uranyumdan dolayı  $U^{238}$  izotopunun normal yakıtlara göre daha çok miktarda bulunması, dolayısıyla daha çok Pu üretilmesidir. Ortamda daha çok fisil Pu bulunması, gücün daha büyük bir kısmının Pu'dan elde edilmesini sağlamakta, bu da daha çok  $U^{235}$ 'in yanmadan kalmasına neden olmaktadır. Elbette burada sözedilen miktarlar küçüktür (ppm düzeyinde).

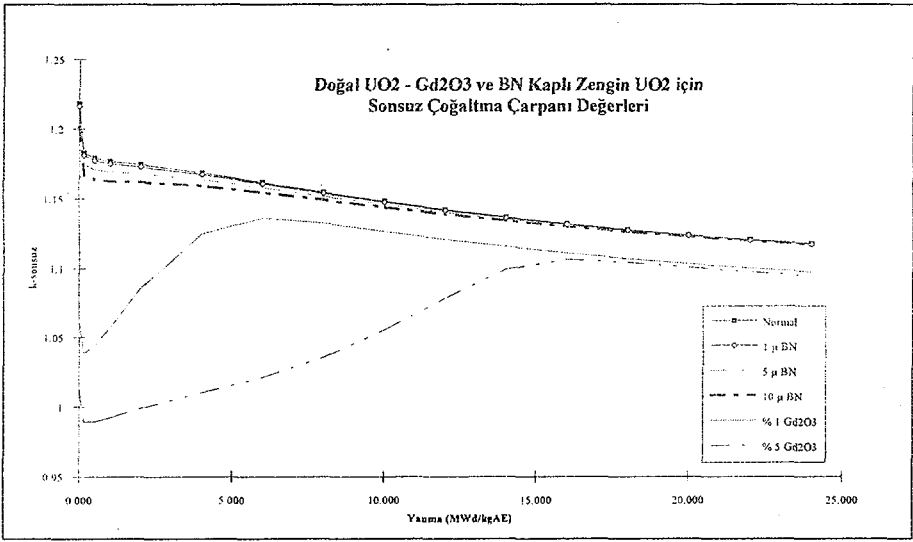
Yakıt demeti içi güç dağılımlarının karşılaştırılabilmesi için, %5  $Gd_2O_3$  içeren yakıtlar bulunduran bir demetin güç dağılımı Şekil 5'te ve 5 $\mu$  BN kaplı yakıtlar bulunduran bir demetin güç dağılımı da Şekil 6'da gösterilmiştir. Şekiller bir demetin 1/8'ini göstermekte olup, kontrol ve algılayıcı çubuklarının yerleri boş bırakılmış, yanabilir zehir içeren yakıt hücrelerinin çevresi de koyu çizgiyle belirtilmiştir. Güç tepe değeri  $Gd_2O_3$  içeren demet için çevrim başında 1.20 iken çevrim sonunda 1.11'e düşmekte, BN içeren demet için ise 1.05 değerinde hemen hemen değişmeden kalmaktadır. Bu davranış da gadolinyum'un bor'dan daha büyük etkin kesite sahip olmasından ve daha önce tükenmesinden kaynaklanmaktadır.

## GENEL SONUÇ

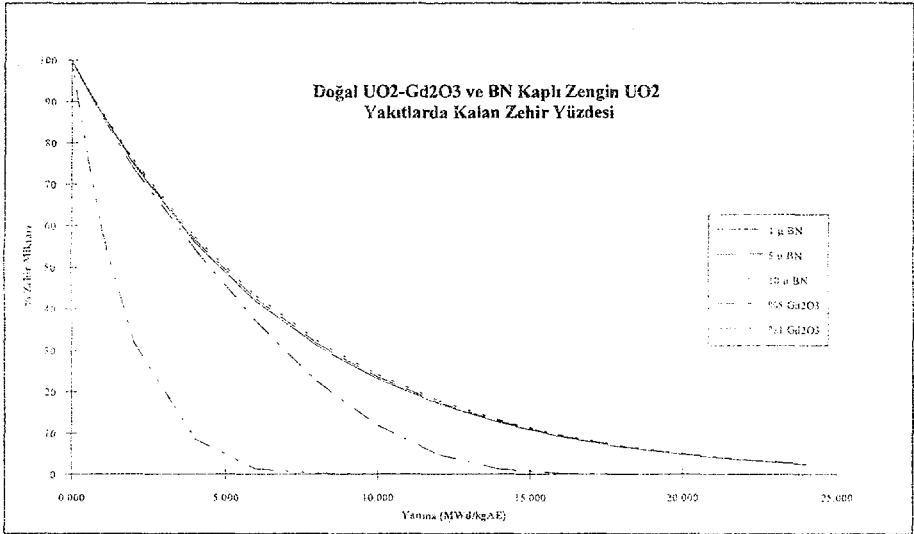
BN kaplama,  $Gd_2O_3$ 'e göre daha uygun görülmektedir. Çok az miktarda kullanıldığından gerekli miktarı ayarlamak;  $k_{\infty}$  davranışını daha az etkilediğinden de yakıt yönetimi sürecinde etkilerini öngörmek daha kolaydır. Ayrıca, gereksiz güç tepelerine yol açmadığı için de güvenlik yönünden daha az sakıncalıdır.

## KAYNAKLAR

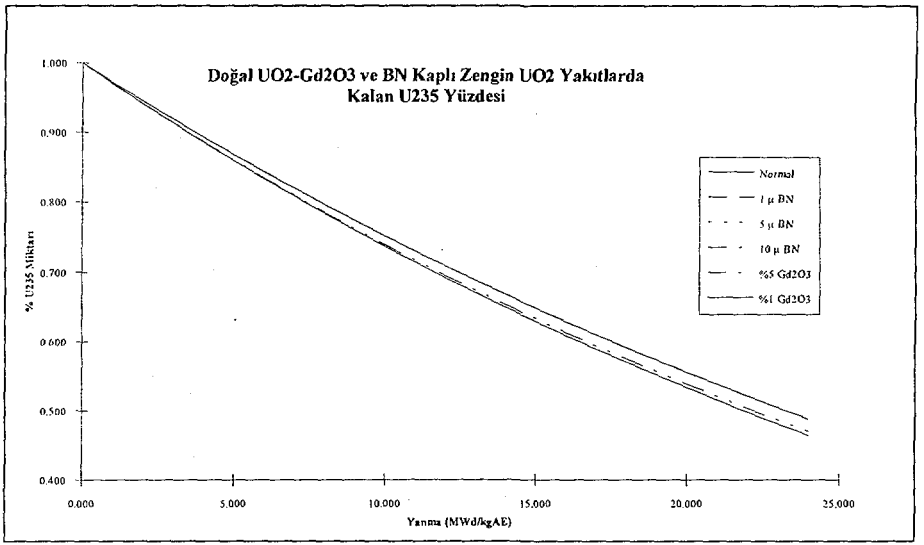
[1] ROTH, M. J., "The Collision Probability Modules of WIMSE-E", AEEW-R 1920.



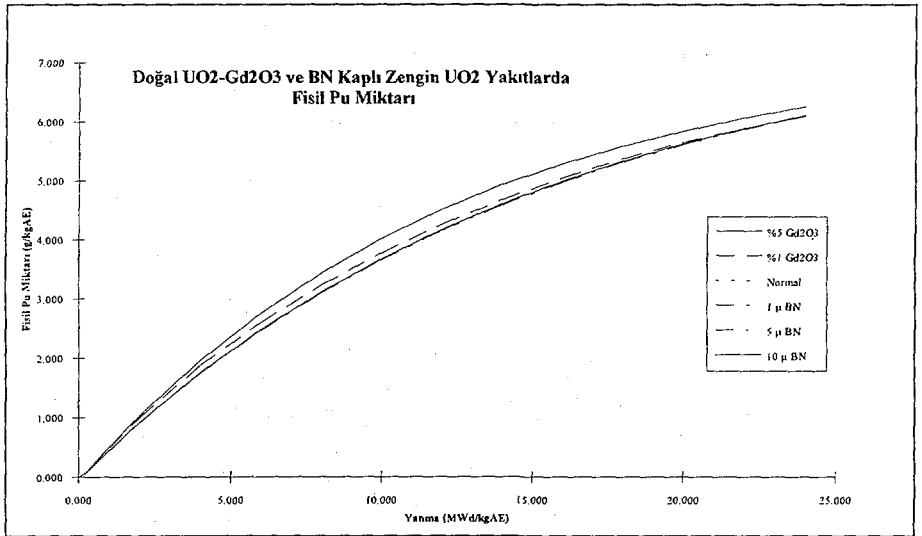
**Şekil 1. Sonsuz Çoğaltma Çarpanı Karşılaştırması**



**Şekil 2. Yanabilir Zehir Miktarı Karşılaştırması**



**Şekil 3. U<sup>235</sup> Miktarı Karşılaştırması**



**Şekil 4. Fisil Pu Miktarı Karşılaştırması**

1.10	1.12		1.17	1.15		0.96	0.99	
1.03	1.07		1.10	1.10		1.08	1.08	
1.00	1.04		1.07	1.08		1.11	1.10	
1.07	1.06	1.13	1.15	1.13	1.07	0.13	0.91	
1.03	1.04	1.08	1.07	1.07	1.09	0.44	1.05	
1.01	1.03	1.06	1.05	1.05	1.09	0.61	1.09	
1.01	0.14	1.10	1.15	1.15	1.11	0.98		
1.02	0.43	1.08	1.08	1.08	1.10	1.06		
1.01	0.58	1.07	1.05	1.05	1.09	1.08		
1.04	1.06		1.19	1.20				
1.02	1.06		1.11	1.11				
1.01	1.05		1.08	1.08				
1.03	1.03	1.13	1.19	1.20				
1.01	1.03	1.10	1.11	1.11				
1.00	1.02	1.08	1.09	1.08				
1.00	0.14	1.08						
1.00	0.42	1.07						
1.00	0.57	1.06						
1.04	1.00	1.04						
1.00	1.00	1.02						
0.98	0.99	1.01						
1.08	1.06							
1.00	1.00							
0.97	0.97							
1.11								
1.00								
0.97								

- Çevrim Başı Bağlı Gücü
- Çevrim Ortası Bağlı Gücü
- Çevrim Sonu Bağlı Gücü

Şekil 5. %5 Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub> İçeren Yakıt Bulunduran Demette Güç Dağılımı

0.98	1.01		1.03	1.03		1.02	1.03	
0.98	1.00		1.03	1.03		1.03	1.03	
0.97	1.00		1.03	1.03		1.03	1.03	
0.98	1.00	1.02	1.01	1.01	1.03	1.00	1.00	
0.97	0.99	1.02	1.01	1.01	1.03	1.02	1.01	
0.97	0.99	1.02	1.00	1.01	1.03	1.05	1.01	
0.98	0.98	1.02	1.01	1.01	1.03	1.01		
0.97	1.00	1.02	1.01	1.01	1.03	1.01		
0.97	1.02	1.02	1.01	1.01	1.03	1.01		
0.98	1.00		1.04	1.04				
0.97	1.00		1.04	1.04				
0.97	1.00		1.04	1.04				
0.97	0.99	1.03	1.05	1.04				
0.96	0.99	1.03	1.05	1.04				
0.96	0.98	1.03	1.05	1.04				
0.96	0.95	1.01						
0.95	0.98	1.01						
0.95	1.00	1.01						
0.95	0.95	0.98						
0.94	0.95	0.98						
0.94	0.94	0.97						
0.95	0.95							
0.94	0.93							
0.93	0.93							
0.95								
0.94								
0.93								

- Çevrim Başı Bağlı Gücü
- Çevrim Ortası Bağlı Gücü
- Çevrim Sonu Bağlı Gücü

Şekil 6. 5µ BN Kaplı Yakıt Bulunduran Demette Güç Dağılımı