

Atıf İçin: Arslan, A. B., Durmaz, B. ve Yapıcı, H. (2025). Minör Aktinit ve Toryum Kullanılan Bir Hızlandırıcılı Sürücülü Sistemde Performansın Değerlendirilmesi. *İğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 15(3), 1032-1039.

To Cite: Arslan, A. B., Durmaz, B. & Yapıcı, H. (2025). Assessment of Performance in an Accelerator-Driven System Using Minor Actinides and Thorium. *Journal of the Institute of Science and Technology*, 15(3), 1032-1039.

Minör Aktinit ve Toryum Kullanılan Bir Hızlandırıcılı Sürücülü Sistemde Performansın Değerlendirilmesi

Alper Buğra ARSLAN¹, Büşra DURMAZ², Hüseyin YAPICI³

Öne Çıkanlar:

- Nükleer atık dönüşümü
- MCNPX 2.7
- Nükleer enerji
- Nötron çoğaltma faktörü

Anahtar Kelimeler:

- Enerji kazancı
- Hızlandırıcı sürücülü sistemler
- Minör aktinit
- Toryum dioksit

ÖZET:

Hızlandırıcı Sürücülü Sistemler, geleneksel reaktörlerden farklı olarak kritik-altı çalışma prensibine sahip olup, hızlandırıcı kapatıldığında zincirleme reaksiyonun durması sayesinde daha güvenli bir teknoloji sunar. Bu sistemler, termal reaktörlerden elde edilen minör aktinitlerin dönüştürülmesi, yeni radyoizotop üretimi ve güvenli enerji sağlanması gibi alanlarda önemli bir rol oynamaktadır. Ayrıca, toryum kaynaklı yakıt döngüsüyle çalışabilme özelliği sayesinde daha temiz ve bol bulunan bir enerji kaynağı olarak öne çıkmaktadır. Bu çalışmada, nükleer atıkların dönüştürülmesi, toryumun enerji üretiminde değerlendirilmesi ve enerji kazancının incelenmesi temel odak noktalarıdır. Araştırmada, termal reaktörlerden elde edilen karışık oksit yakıtı (MOX) türleri (MOX11, MOX21, MOX12 ve MOX22) kullanılmıştır. Bu bağlamda, tasarlanan sistemin yakıt bölgesine, MOX yakıtında belirli oranlarda doğal olarak bulunan minör aktinit dioksitin yanı sıra toryum dioksit eklenerek hızlandırıcı sürücülü sistemin enerji kazancı analiz edilmiştir. Çalışma sonucunda, en yüksek enerji kazancının, %90 minör aktinit dioksit ve %10 toryum dioksit içeren yakıt karışımı ile elde edildiği belirlenmiştir. Nötronik hesaplamalar, MCNPX 2.7 nükleer kodu kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Assessment of Performance in an Accelerator-Driven System Using Minor Actinides and Thorium

Highlights:

- Transmutation of nuclear waste
- MCNPX 2.7
- Nuclear energy
- Neutron multiplication factor

Keywords:

- Energy gain
- Accelerator driven system
- Minor actinide
- Thorium dioxide

ABSTRACT:

Accelerator-Driven Systems (ADS) operate on a subcritical principle, distinguishing them from conventional reactors by ensuring that the chain reaction ceases when the accelerator is turned off, thereby providing a safer technology. These systems play a crucial role in the transmutation of minor actinides derived from thermal reactors, the production of new radioisotopes, and the generation of secure energy. Additionally, their ability to operate with a thorium-based fuel cycle makes them a cleaner and more abundant energy source. This study focuses on the transmutation of nuclear waste, the utilization of thorium in energy production, and the assessment of energy gain. In the research, various types of mixed oxide (MOX) fuels (MOX11, MOX21, MOX12, and MOX22) obtained from thermal reactors were used. In this context, the energy gain of the accelerator-driven system was analyzed by adding thorium dioxide to the fuel region of the designed system, alongside the minor actinide dioxide that is naturally present in MOX fuel at certain proportions. The study found that the highest energy gain was achieved with a fuel mixture containing 90% minor actinide dioxide and 10% thorium dioxide. Neutronic calculations were performed using the MCNPX 2.7 nuclear code.

¹ Alper Buğra ARSLAN ([Orcid ID: 0000-0001-9964-2342](https://orcid.org/0000-0001-9964-2342)), Batman Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Petrol ve Doğalgaz Mühendisliği Bölümü, Batman, Türkiye

² Büşra DURMAZ ([Orcid ID: 0000-0001-6659-1067](https://orcid.org/0000-0001-6659-1067)), Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Kırşehir, Türkiye

³ Hüseyin YAPICI ([Orcid ID: 0000-0003-2994-7786](https://orcid.org/0000-0003-2994-7786)), Başkent Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Ankara, Türkiye

***Sorumlu Yazar/Corresponding Author:** Alper Buğra ARSLAN, e-mail: alperbugra.arslan@batman.edu.tr

GİRİŞ

Günümüzde nüfus oranındaki hızla artış ve bunun beraberinde meydana gelen endüstriyel gelişmeler enerji tüketimini artırmış ve bu artış yeni enerji arayışlarına yol açmıştır. Fosil yakıtların sınırlı rezervlere sahip olması ve aynı zamanda çevresel etkileri alternatif enerji kaynaklarına olan ilgiyi yoğunlaştırmış, özellikle iklim değişikliği, hava kirliliği ve doğal kaynakların tükenme tehlikesi gibi sorunlar, yenilenebilir enerji gibi temiz ve sürdürülebilir çözümlere olan ihtiyacı daha da belirgin hale getirmiştir. Bu doğrultuda, nükleer enerji diğer enerji kaynaklarına göre daha düşük işletme maliyeti, yüksek enerji üretim potansiyeli, güvenilirliği ve çevresel etkilerinin daha sınırlı olması sayesinde enerji kaynakları arasında dikkat çekici bir seçenek haline gelmiştir. Nükleer reaktörlerde çevrim sırasında enerji üretiminin yanısıra büyük miktarda radyoaktif atık oluşmakta bu atıklar çevresel kirliliğine yol açmakta ve aynı zamanda depolama açısından ciddi sorunları beraberinde getirmektedir. Nükleer enerjinin potansiyelinden tam anlamıyla faydalanabilmek için bu atıkların güvenli ve etkili bir şekilde yönetilmesi gereklidir. Hızlandırıcı sürücülü sistemler (HSS), kullanılmış yakıtlardaki uzun ömürlü radyoizotopları daha kısa ömürlü fisyon ürünlerine dönüştürebilme ve kritik altı çalışma özellikleriyle ön plana çıkmaktadır. HSS'ler, atık yönetimi sorunlarına sürdürülebilir bir çözüm sunması nedeniyle önemi her geçen gün artmaktadır. Bu gerekçeler çalışmada atık yönetimi konusunda HSS üzerinde yoğunlaşılmasına sebep olmuştur.

Bazı reaktör tasarımları özellikle yeni nesil reaktör tasarımları, kullanılmış yakıtı yeniden işlemeye veya uzun ömürlü radyoaktif izotopları daha kısa ömürlü ve daha az zararlı hale dönüştürmeye olanak tanımaktadır (Takeda ve Yokoyama, 1997). Yapıcı ve arkadaşlarının yaptıkları bu çalışmada, yüksek yanma seviyesine sahip PWR-MOX (Basınçlı Su Reaktörü - MOX yakıt) kullanılmış yakıtından çıkarılan minör aktinitlerin, dönüşümünü incelemektedir. Bu çalışma, minör aktinitlerin dönüşümü gerçekleştirmek için alternatif reaktör tasarımlarını değerlendirmektedir. Araştırma, bu tür reaktörlerin minör aktinitlerin bertarafındaki etkinliğini ve olası avantajlarını tartışmaktadır (Yapıcı ve ark., 2003). Hızlandırıcı sürücülü sistemler, Minör Aktinitleri (MA) ve toryumu yakıt olarak kullanması açısından nükleer atık yönetimi ve sürdürülebilir enerji üretimi için önemli bir araştırma alanı haline gelmiştir. Gohar ve arkadaşlarının yaptıkları çalışmada, hızlandırıcı sürücülü sistem tasarımı üzerinde durmuşlar ve ABD'nin kullanılmış nükleer yakıt stoklarının bertarafı ve minör aktinitlerin dönüşümü üzerine analiz bir analiz gerçekleştirmişlerdir. Bu analiz ile radyoaktif atık sorunlarının çözümü üzerine durmuşlardır (Gohar ve ark., 2021). Gohar ve arkadaşlarının diğer bir çalışmasında ise, ABD'nin kullanılmış nükleer yakıt envanterini bertaraf etmek için hızlandırıcı sürücülü sistemlerin (HSS) uygulanabilirliğini incelemektedir. HSS teknolojisinin, radyoaktif atıkların çevresel faktörlerin azaltılması açısından sunduğu faydaları üzerinde durmuşlardır (Gohar ve ark., 2018). Yapıcı ve arkadaşlarının yaptıkları bu çalışmada, yüksek yanma seviyesine sahip PWR-MOX (Basınçlı Su Reaktörü - MOX yakıt) kullanılmış yakıtından çıkarılan minör aktinitlerin, dönüşümünü incelemektedir. Bu çalışma, minör aktinitlerin dönüşümünü gerçekleştirmek için alternatif reaktör tasarımlarını değerlendirmektedir (Yapıcı, 2003). C. Rubbia ve çalışma arkadaşları, bir hızlandırıcı sürücülü sistemde, doğada bol miktarda bulunan ^{232}Th 'nin fisil bir çekirdek olan ^{233}U 'ye dönüştürülerek enerji üretiminde kullanılabileceğini göstermiştir. Bu çalışma, toryumun dönüştürülmesi yoluyla sürdürülebilir fisyon enerjisi üretimi potansiyelini vurgulamış ve hızlandırıcı destekli sistemlerin bu süreçteki etkinliğini detaylı olarak ele almıştır (Rubbia ve ark., 1995). Tsujimoto ve arkadaşları, radyoaktif atıkların zararsız hale getirilmesi için yeni bir yöntem geliştirmişlerdir. Minör aktinitlerin dönüşümü için kurşun bizmut ötektik soğutuculu bir hızlandırıcı sürücülü sistem tasarlayarak dikkat çekici bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Bu sistemin nötronik

analizlerinde, yakıt çevrimi boyunca hem yanma hem de geri dönüşüm süreçleri göz önünde bulundurulmuştur. Yapılan kapsamlı hesaplamalar sonucunda, hızlandırıcı sürücülü sistem için elde edilebilecek maksimum nötron çoğaltma faktörünün 0.97 olduğu belirlenmiştir (Tsujiimoto ve ark., 2004). Cho ve ekibi, hızlandırıcı sürücülü sistemlerin performansını optimize etmek amacıyla kapsamlı bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Özellikle 1000 MW gücünde bir sistemde, 20 MW'lık bir nötron spallasyon hedefi için en uygun tasarım parametrelerini belirlemek için sayısal simülasyonlar yapmışlardır. Hedef içindeki kurşun-bizmut alaşımının akış hızını düşürmek için çift borulu bir enjeksiyon sistemi önermişlerdir (Cho ve ark., 2004). Adam ve arkadaşları, hızlandırıcı sürücülü sistemlerde (HSS) nükleer atıkların zararsız hale getirilmesi konusunda önemli bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Özellikle, kurşun-bizmut alaşımı soğutuculu bir HSS'de, ^{239}Pu , ^{129}I , ^{237}Np , ^{238}Pu ve ^{241}Am gibi uzun ömürlü radyoaktif izotopların dönüştürülmesi üzerine odaklanmışlardır. Çalışmalarında, LA150 kütüphanesi ve MCNPX simülasyon kodu gibi güçlü araçları kullanarak detaylı analizler yapmışlardır (Adam ve ark., 2007). Şarer ve ekibi, hızlandırıcı sürücülü sistemlerin performansını değerlendirmek amacıyla kapsamlı bir çalışma gerçekleştirmiştir. MCNPX-2.5.0 Monte Carlo simülasyon kodunu kullanarak, farklı sistem tasarımlarının nötron üretim verimliliği ve enerji dağılımı gibi önemli parametreleri incelemişlerdir. Doğal kurşun hedef malzemesi üzerinde yapılan çalışmalarda, hedef yarıçapının optimize edilmesiyle maksimum nötron üretimi elde edilmeye çalışılmıştır (Şarer ve ark., 2013). Chen ve ekibi, nükleer atıkların zararsız hale getirilmesi amacıyla kritik altı çalışan bir hızlandırıcı sürücülü sistem üzerinde çalışmalar yapmıştır. Bu sistemde soğutucu olarak kurşun-bizmut alaşımı, yakıt olarak ise metal alaşım ve metalik dağılımlı yakıtlar kullanılmıştır. Araştırmacılar, etkin nötron çoğaltımı, lineer güç yoğunluğu ve hızlı nötron etkisi gibi önemli parametreleri optimize ederek sistemin performansını artırmayı hedeflemişlerdir. Elde edilen sonuçlar, nükleer atıkların dönüşüm hızının özellikle yakıtın bileşimi ile yakından ilişkili olduğunu göstermiştir (Chen ve ark., 2015). Gerçekleştirilen çalışmada, hızlandırıcı sürücülü sistemler kapsamında bir nükleer atık dönüşüm reaktörü için farklı proton ışın demeti giriş konumlarının, güç yoğunluğu dağılımı, nötron kaçağı ve nükleer atık dönüşüm verimliliği üzerindeki etkilerini analiz edilmiştir. Çalışma neticesinde, Cm-244 izotopu için, (n,γ) yakalama reaksiyonu yoluyla diğer nüklitlerin kademeli olarak birikmesi dikkate alındığında, 1000 MW gücündeki bir basınçlı su reaktöründen elde edilen doğrudan nükleer atıkta maksimum dönüşüm oranına ulaşılabilmesi için işletme süresinin en az 2.5 yıl olması gerektiği görülmüştür (Lv ve ark., 2024). Bu çalışmada, Çin'in sürdürülebilir ve temiz nükleer enerjiye geçiş sürecinde hızlandırıcı sürücülü sistemlerin (HSS) kullanımıyla nükleer atıkların bertarafına yönelik stratejiler incelenmiştir. Ayrıca, HSS kapsamında, basınçlı su reaktöründen elde edilen kullanılmış yakıttaki %95'ten fazla minör aktinitin (MA) bertarafı için gereken süre de değerlendirilmiştir (Zhang ve ark., 2023).

Bu çalışma, son yıllarda ön plana çıkan toryum bazlı yakıtların değerlendirilmesi kapsamında, PWR tipi termal reaktörlerden elde edilen minör aktinitlerin (MA) yeniden değerlendirilmesi üzerine odaklanmaktadır. ThO_2 ve MAO_2 bileşiklerinin belirli oranlarda karıştırılarak hızlandırıcı sürücülü sistemin yakıt bölgesine yerleştirilmesiyle, sistemin enerji kazancı analiz edilmiştir. Çalışma, nükleer atıkların dönüştürülmesi ve alternatif yakıt stratejilerinin etkinliğinin araştırılması açısından literatüre önemli bir bilimsel katkı sağlamaktadır. Bu bağlamda, toryum temelli hibrit yakıtların gelecekteki nükleer enerji sistemlerindeki rolüne yönelik yeni değerlendirmeler sunmaktadır.

MATERYAL VE METOT

Bu çalışmada, hızlandırıcı sürücülü sistem kullanılmıştır. Silindirik geometride tasarlanan HSS'nin dikey kesit görünümü şekil 1'de gösterilmektedir. HSS, spallasyon nötron hedefi, yakıt

bölgesi, soğutucu ve kalkan bölgesi olmak üzere 4 bölge şeklinde ele alınmıştır. Bu bölgeler şu şekildedir.

Spallasyon Nötron Hedefi: Hızlandırıcı sürücülü sistemde yüksek enerjili protonların hedef malzemeye çarpmasıyla yüksek enerjili nötronların açığa çıkmasını sağlamaktadır. Genellikle spallasyon hedefi olarak kurşun-bizmut ötektik (KBÖ) tercih edilmektedir (Ding ve ark., 2019).

Yakıt bölgesi: Dört farklı MOX türü (MOX11, MOX21, MOX12 ve MOX22) ele alınarak bu yakıtların performans farklılıkları detaylı şekilde incelenmiştir. MOX yakıtlarından alınan minör aktinit dioksitin yanına, farklı oranlarda toryum dioksit eklenerek bu bölgeye konulmuştur. Bu yakıt türleri;

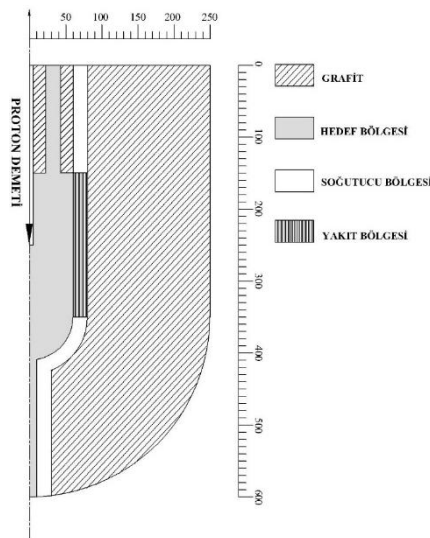
- MOX11, PWR reaktöründen alınan 33 GWd/tHM yanma oranına kadar yakılmış, %3.25 zenginlikteki UO_2 ve plütonyum yakıt karışımı bir minör aktiniti ifade etmektedir. MOX12 ise, MOX11 bileşimlerinin 33 GWd/tHM yanma oranında yakılmasıyla elde edilen bileşimleri ifade eder (NEA, 2000).

- MOX21 yine PWR reaktöründen alınan 50 GWd/tHM yanma oranına kadar yakılmış, %4.65 zenginlikteki UO_2 ve plütonyum karışımını temsil etmektedir. MOX22, MOX21 bileşiminin 50 GWd/tHM yanma oranına kadar yakılmasıyla elde edilen bileşimleri ifade etmektedir (NEA, 2000).

Bu minör aktinit türlerinin seçilmesinde ve oranlarının oluşturulmasında HSS'nin nötron çoğaltma faktörünün kritik-altı bir değerde tutulması gerekliliği göz önünde bulundurulmuştur.

Soğutucu bölge: İnert bir gaz olan ve aynı zaman da düşük nötron soğurma tesir kesitine sahip helyum gazı kullanılmıştır. Helyum gazı, diğer sıvı soğutucuların aksine, su veya sodyum gibi kimyasal tepkimeler sonucu yanıcı veya patlayıcı riskler taşımaz.

Kalkan (grafit) bölgesi: Reaktörün güvenliğinin sağlanması, nötron ve gama radyasyonunu absorbe edilmesi ve çevresel etkileşimleri en aza indirmek için kritik bir bölgelerden bir tanesidir. Bu bölgede malzeme olarak grafit tercih edilmiştir. Grafitin, nötron yavaşlatıcı, termal olarak kararlı, radyasyona dayanıklı ve hafif bir malzeme olması bu bölgede kullanılmasına neden olur.



Şekil 1. Silindirik geometride tasarlanan HSS'nin dikey kesit görünümü (cm)

Sayısal Hesaplamalar

Nötronik analizler, 1000 MeV'luk proton demeti enerjisi ile hesaplanmış ve maksimum enerji kazancı elde edilmiştir (NEA, 2000). Termal reaktörlerin çalışması sonucunda atık olarak değerlendirilen dört farklı MOX türü (MOX11, MOX21, MOX12 ve MOX22) ele alınarak bu yakıtların performans farklılıkları detaylı şekilde incelenmiştir. Her bir MOX yakıt durumu için,

MAO₂ yakıtı %0'dan başlayarak %90 oranına kadar ThO₂ ile karıştırılmış ve hesaplamalar bu şekilde gerçekleştirilmiştir.

Bu yakıt durumlarının, nötron çoğaltma katsayısı (k_{eff}) ve enerji kazancı üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Hızlandırıcı sürücülü sistemler, nötron çoğaltma faktörü (k_{eff}) yaklaşık olarak 1'e yakın bir değere kadar çalıştırıldığında daha kararlı ve güvenilir bir sistem halini alır. Kritik altı çalışmaları sayesinde, reaktörün kendi kendine zincirleme reaksiyona girme riski en aza indirilir. Bu durum, hem nükleer güvenlik hem de kontrol kolaylığı açısından HSS'leri ideal bir seçenek haline getirmektedir. Hesaplamalarda, nötron çoğaltma faktörü, 1 değerini aşmayacak şekilde çalıştırılmış ve elde edilen değerler Çizelge 1'de gösterilmiştir. Yapılan nötronik analizler, MCNPX 2.7 nükleer kodunu kullanılarak gerçekleştirilmiştir (Pelowitz, 2011).

Çizelge 1. MAO₂ ile ThO₂ karışım durumlarında k_{eff} ve Enerji Kazancı değerleri

MAO ₂ [%]	MOX11*		MOX21*		MOX12*		MOX22*	
	k_{eff}	Enerji Kazancı [MeV]	k_{eff}	Enerji Kazancı [MeV]	k_{eff}	Enerji Kazancı [MeV]	k_{eff}	Enerji Kazancı [MeV]
0	0.00	0.01046	0.00	0.01046	0.00	0.00	0.00	0.01046
10	0.15195	0.09390	0.15256	0.10198	0.15797	0.01046	0.18124	0.10928
20	0.26343	0.01712	0.26267	0.18606	0.27389	0.09206	0.27406	0.17634
30	0.36421	0.30588	0.36963	0.32416	0.38488	0.16594	0.38392	0.27720
40	0.46474	0.44056	0.46804	0.43354	0.48273	0.25492	0.49010	0.39986
50	0.55031	0.61182	0.56136	0.64190	0.58278	0.40630	0.58472	0.58488
60	0.64661	0.90214	0.64300	0.91202	0.67659	0.61126	0.60838	0.69466
70	0.72796	1.21760	0.72928	1.30630	0.75962	0.84430	0.76646	1.34334
80	0.80766	1.92582	0.80276	2.03880	0.84492	1.25690	0.85255	2.45460
90	0.88521	3.63460	0.89211	4.09120	0.92903	2.18960	0.92861	5.69740

Sayısal Sonuçlar

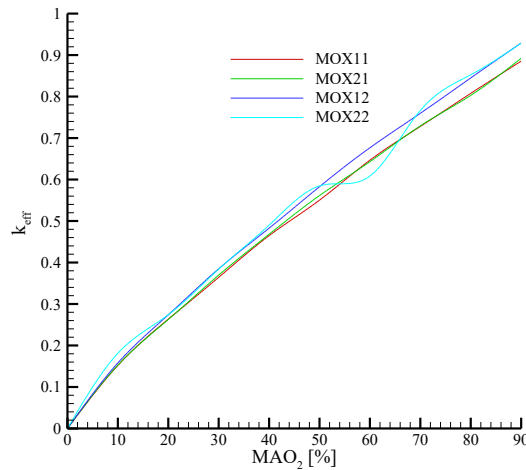
Nötron Çoğaltma Faktörü: k_{eff} , bir nötron neslinin bir sonraki nesilde ürettiği nötron sayısına oranını ifade eder ve reaktörün kritiklik durumunu belirler. Nötron çoğaltma faktörü nükleer reaktörler için önemli bir parametredir.

$$k_{eff} = \frac{\text{Bir sonraki nesildeki nötron sayısı}}{\text{Bir önceki nesildeki nötron sayısı}} \quad (1)$$

Çizelge 1, MAO₂ ve ThO₂ karışım oranlarına bağlı olarak k_{eff} ve enerji kazancı değerlerini dört farklı MOX türü için göstermektedir.

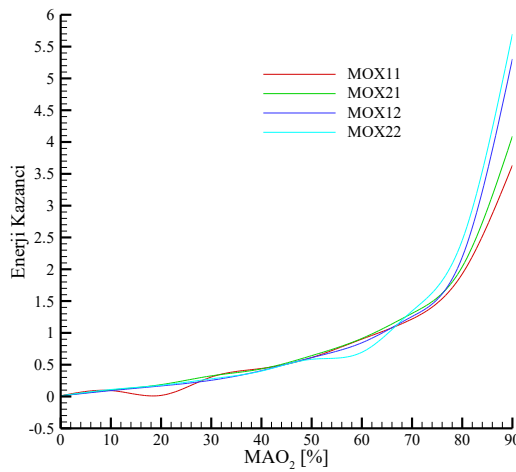
Şekil 2'de %0 ile %90 aralığında değişen MAO₂ oranına karşılık elde edilen k_{eff} değerleri görülmektedir. Başlangıçta MAO₂ değeri % 0 değerinde olduğu için 4 MOX durumu için k_{eff} değerleri 0 olarak elde edilmiştir. Çizelge 1 ve Şekil 2 incelendiğinde, en yüksek k_{eff} değerine (0.92861), %90 MAO₂ konulduğunda MOX22 durumunda ulaşıldığı görülmüştür. 4 ayrı MOX durumu için grafiklerin eğilimi incelediğinde MAO₂ yüzdesi arttıkça nötron çoğaltma faktörünün artış eğiliminde olduğu görülmektedir. Bu artış, MAO₂'nin fisil maddelerce zenginleştirilmesine katkıda bulunduğunu ve nötron çoğaltımında etkili olduğunu göstermektedir.

Enerji Kazancı: Hızlandırıcı sürücülü sistemlerde (HSS), fisyon reaksiyonları tarafından üretilen toplam enerji ile sisteme proton demetlerini hızlandırmak için harcanan enerji arasındaki oran olarak tanımlanır. Bu kavram, bir HSS'nin enerji verimliliğini ve harcanan enerjiye kıyasla ne kadar enerji üretebildiğini değerlendirmek için temel bir ölçüttür.

Şekil 2. MAO₂ oranına göre k_{eff} 'in değişimi

$$G = \frac{R_f E_f}{E_p} \quad (2)$$

E_p , Proton enerjisi ve E_f , fisyon başına açığa çıkan enerjidir.

Şekil 3. MAO₂ oranına göre enerji kazancının değişimi

Şekil 3 ve Çizelge 1'de 4 ayrı MOX durumu için MAO₂'nin değişimine göre elde edilen enerji kazançları görülmektedir. MAO₂ en temel durumunda (%0) her bir MOX yakıt durumu için 0.01046 değeri elde edildiği görülmüştür. En yüksek enerji kazancı değerine ise, MOX22 yakıtı durumunda ve MAO₂ %90 olarak konulduğunda elde edildiği görülmüştür. MAO₂ oranı arttıkça, enerji kazanç değerlerinde de anlamlı bir artış gözlemlenmiştir. Özellikle MOX22 için %80-%90 MAO₂ oranlarında kazanç, diğer türlere göre daha yüksek bir sıçrama göstermiştir. Bu durum, yüksek MAO₂ içeriğinin fisyon reaksiyonlarından elde edilen enerjiye önemli bir katkı sağladığını ortaya koymaktadır.

BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar şunlardır:

- Dört farklı MOX yakıt durumu için sonuçlar incelendiğinde, MAO₂ oranının artmasıyla nötron çoğaltma faktörünün doğrusal bir artış eğiliminde olduğu gözlemlenmiştir.

• Hızlandırıcı sürücülü sistemin kritik altı çalışması sebebiyle, k_{eff} değerleri 1'in altındadır. En yüksek elde edilen nötron çoğaltma faktörü değeri 0.92861, %90 MAO₂ konulduğunda MOX22 durumunda ulaşıldığı görülmüştür.

• Çizelge 1 ve şekil 3'teki veriler, incelenen tüm MOX yakıt varyasyonlarında MAO₂ oranındaki artışın enerji kazancını parabolik biçimde artırdığını ortaya koymaktadır.

• En yüksek enerji kazancı değeri olan 5.69740 ise, MOX22 yakıtı durumunda ve MAO₂ %90 olduğu durumda elde edildiği görülmüştür.

Elde edilen bu bulgular, HSS'nin nükleer atıkların dönüşümünde etkin bir araç olduğunu göstermektedir. Ayrıca, ulaşılan enerji kazancı değerleri, sistemin uzun vadede daha verimli çalışmasını sağlayarak sürdürülebilir nükleer enerji üretimine de katkıda bulunur.

SONUÇ

Çizelge ve grafikler, MAO₂ oranının yakıt karışımında artmasının nötron çoğaltma katsayısını belirgin şekilde iyileştirdiğini ve %50'nin üzerindeki oranlarda nötronik performansı önemli ölçüde artırdığını göstermektedir. MOX22 yakıtı, elde edilen yüksek k_{eff} değerleriyle, MAO₂ ve ThO₂ kombinasyonlarının optimize edilmesiyle öne plana çıkmaktadır. Özellikle, MAO₂ oranının yükseltilmesi, hem nötron çoğaltma hem de enerji verimliliği açısından olumlu sonuçlar vermektedir. MOX22, dönüşüm süreçleri ve enerji üretiminde en yüksek verimliliği sağlayarak, bu alanda tercih edilen bir yakıt türü olduğunu ortaya koymaktadır. Ayrıca, ThO₂'nin düşük zenginleştirme ihtiyacı ve bulunabilirliği, sürdürülebilir nükleer enerji için değerli bir seçenek olduğunu göstermektedir.

Çıkar Çatışması

Makale yazarları aralarında herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan ederler.

Yazar Katkısı

Yazarlar makaleye eşit oranda katkı sağlamış olduklarını beyan eder.

KAYNAKLAR

- Adam, J. (2007). Transmutation of I-129, Np-237, Pu-238, Pu-239, and Am-241 using neutrons produced in target-blanket system 'energy plus transmutation' by relativistic protons. *Pramana - Journal of Physics*, 68(2), 201-212.
- Cho, C. H., Song, T. Y., & Tak, N. I. (2004). Numerical design of a 20 MW lead-bismuth spallation target for an accelerator-driven system. *Nuclear Engineering and Design*, 229(2-3), 317-327.
- Chen, Z., Wu, Y., Yuan, B., & Pan, D. (2015). Nuclear waste transmutation performance assessment of an accelerator-driven subcritical reactor for waste transmutation (ADS-NWT). *Annals of Nuclear Energy*, 75, 723-727..
- Ding, H., Gan, Q., Hao, L., Song, J., & Wu, Y. (2019). Verification and application of SuperMC3. 3 to lead-bismuth-cooled fast reactor. *Nuclear Technology and Radiation Protection*, 34(2), 122-128..
- Gohar, Y., Cao, Y., & Kraus, A. R. (2021). ADS design concept for disposing of the U.S. spent nuclear fuel inventory. *Annals of Nuclear Energy*, 160, 108385.
- Gohar, Y., Cao, Y., & Kraus, A. R. (2018). *Accelerator-Driven Subcritical System for Disposing of the US Spent Nuclear Fuel Inventory* (No. ANL-18/07). Argonne National Lab.(ANL), Argonne, IL (United States).

- Ly, Z., Zhao, Z., Chen, Z., Pan, D., & Wu, J. (2024). The influence of source locations of different multi-beam concept on the power density distribution and nuclear waste transmutation performance for ADS–NWT. *Nuclear Engineering and Design*, 422, 113139.
- NEA, 2000. Calculations of Different Transmutation Concepts an International Benchmark Exercise. Nuclear Science Committee.).
- Pelowitz, D. B. (2011). *MCNPX user's manual* (Version 2.7.0, LA-CP-11-00438). Los Alamos Scientific Laboratory.
- Rubbia, C., Rubio, J. A., Buono, S., Carminati, F., Fiétier, N., Galvez, J., Gelés, C., Kadi, Y., Klapisch, R., Mandrillon, P., Revol, J. P., & Roche, C. (1995). *Conceptual design of a fast neutron operated high power energy amplifier* (CERN/AT/95-44). European Organization for Nuclear Research.
- Şarer, B., Şahin, S., Çelik, Y., & Günay, M. (2013). Evaluation of integral quantities in an accelerator driven system using different nuclear models implemented in the MCNPX Monte Carlo transport code. *Annals of Nuclear Energy*, 62, 382–389.
- The European Technical Working Group on ADS System. (2001, April). *A European roadmap for developing accelerator driven systems (ADS system) for nuclear waste incineration*.
- Tsujimoto, K., Sasa, T., Nishihara, K., Takano, H., & Oigawa, H. (2004). Neutronics design for lead–bismuth cooled accelerator-driven system for transmutation of minor actinide. *Journal of Nuclear Science and Technology*, 41(1), 21–36.
- Takeda, T., & Yokoyama, K. (1997). Study on neutron spectrum for effective transmutation of minor actinides in thermal reactors. *Annals of Nuclear Energy*, 24(9), 705-719.
- Yapıcı, H. (2003). Study on transmutation of minor actinides discharged from high burn-up PWR-MOX spent fuel in the force-free helical reactor. *Annals of Nuclear Energy*, 30(4), 413-436.
- Zhang, X., Pu, N., Cai, H., Jia, H., & He, Y. (2023). Strategies of eliminating nuclear waste using accelerator-driven system in the transition stage for sustainable and clean nuclear energy in China. *Annals of Nuclear Energy*, 185, 109713.
- Zhivkov, P., Stoyanov, C., & Furman, W. (2018). Accelerator driven system for transmutation and energy production. *EPJ Web of Conferences*, 194(4), 1-4.