

HIZLANDIRICI GÜDÜMLÜ SİSTEMLERDE BAZI UZUN ÖMÜRLÜ NÜKLEER ATIKLARIN DÖNÜŞÜMÜNÜN İNCELENMESİ

Mehmet Emin KORKMAZ*, Mehtap GÜNAY, Başar ŞARER***

*Gazi Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi, Fizik Bölümü, 06500, Ankara, Türkiye

**İnönü Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi, Fizik Bölümü, 44280, Malatya, Türkiye
email: mkorkmaz@gazi.edu.tr

Alınış: 14 Mart 2008, Kabul: 27 Ekim 2008

Özet: Bu çalışmada Hızlandırıcı Güdümlü Sistem (ADS) kullanılarak uzun yarı ömürlü ^{99}Tc , ^{129}I , ^{237}Np , ^{238}U ve ^{239}Pu nükleer atıkların kararlı veya kısa yarı ömürlü izotoplara dönüşümleri incelenmiştir. Bunun için sırasıyla 1, 2 ve 3 GeV enerjili ve 10 mA akım şiddetine sahip proton demeti, doğal kurşun hedefe gönderilmiştir. Bu enerjiler için proton başına üretilen nötron sayısı (çoğaltma faktörü), uzun ömürlü atıkların dönüşüm oranları, nötron akı dağılımları ve güç yoğunluğu incelenmiştir. Sistemde soğutucu olarak sıvı Na kullanılmıştır. Üç boyutlu nükleonik hesaplamalar MCNPX Monte Carlo kodu ve ENDF/B-VI nükleer veri kütüphanesi kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Anahtar kelimeler: Hızlandırıcı güdümlü sistem, nükleer atık, MCNPX, ENDF/B-VI

INVESTIGATION OF TRANSMUTATION OF SOME LONG LIVED NUCLEAR WASTES IN ACCELERATOR DRIVEN SYSTEMS

Abstract: In this study, Accelerator Driven System (ADS) is used to investigate the transmutation of five long-lived nuclear wastes like ^{99}Tc , ^{129}I , ^{237}Np , ^{238}U , ^{239}Pu into stable or short-lived isotopes. The acceleration driven system is composed of a natural lead target, subcritical core, liquid sodium coolant and structural material. The transmutation rate of long-lived nuclear waste, the neutron production number per beam proton, neutron and power distribution in the cylinder vessel are analyzed by 1, 2 and 3 GeV (10mA) proton beam energies. Three dimensional nucleonic calculations is carried out using Monte Carlo code MCNPX and ENDF/B-VI nuclear data.

Key words: Accelerator driven system, nuclear waste, MCNPX, ENDF/B-VI

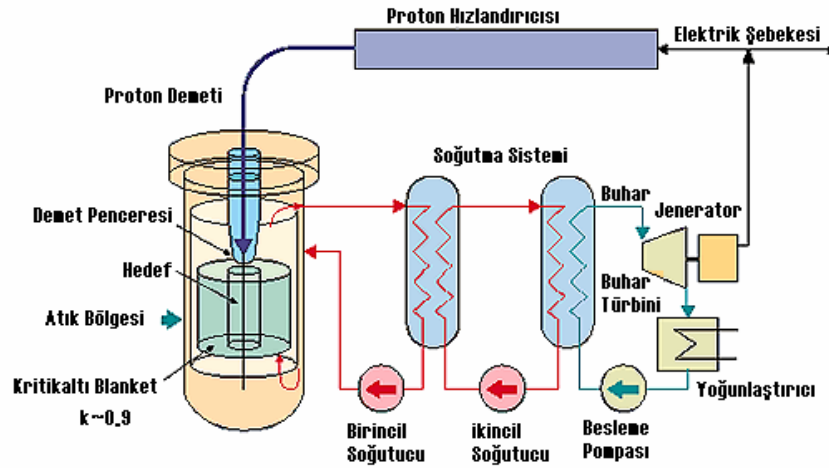
GİRİŞ

Günümüzde elektrik üretmek için işletilen nükleer güç reaktörleri (LWR, PWR, CANDU) genellikle, düşük zenginlikte uranyumdan (%3-3,5 oranında ^{235}U) yapılmış yakıt kullanmaktadır (TRELLE 2003). Nükleer yakıtların en önemli avantajları, fosil yakıtlar gibi çevreye kükürt ve azot oksitleri içeren kirletici oksitleri salmaması ve karbondioksit gibi küresel ısınmaya neden olan ürünler vermemesidir (GARWIN 2001). Reaktörlerde nükleer yakıtın bir kez kullanımı sonucunda “yüksek seviyeli atık” adını verdiğimiz uranyum ötesi (Pu, Am, Np, Cm...) elementler ve uzun ömürlü fisyon ürünleri (^{99}Tc , ^{129}I gibi) oluşmaktadır (TUCEK 2000). Radyoaktif atıkların çevre ve insan sağlığını etkilememesi, insanların ve çevrenin en etkin şekilde korunması amacıyla bütün dünyada çalışmalar yapılmaktadır (SALVATORES 2005, TOSHINOBU vd. 2003). Nükleer silahların sökülmesinden ortaya çıkan (yüksek oranda zenginleştirilmiş ^{239}Pu ve ^{235}U) stratejik malzemenin yok edilmesi de

bir başka sorundur. Askeri alanlardaki plutonyum stoklarının ortadan kaldırılması için özel sistemler tasarlanmaktadır. RUBBIA vd. (1990), bir hızlandırıcıdan gelen protonları kritikaltı reaktöre yerleştirilen hedefe göndererek nötron üretimiyle hızlandırıcının harcadığı enerjiden daha yüksek enerji üreten Enerji Yükseltici (EA) adını verdikleri Hızlandırıcı Gdümlü Sistemin (ADS; Accelerator Driven System) temelini oluşturdular. C. Rubia, doğada bol miktarda bulunan ^{232}Th 'nin bu sistemde dönüştürüldüğü fisil çekirdekten (^{233}U) fisyon enerjisi elde edilebilirliğinin mümkün olduğunu göstermiştir (RUBBIA vd. 1995). Depolama alanlarındaki atık miktarını azaltmak, harcanmış yakıtta bulunan uranyum-ötesi elementleri kullanmak üzere tekrar işleyerek geri kazanmak ve uzun ömürlü fisyon ürünlerini zararsız hale getirmek için bu yeni nesil nükleer reaktörler üzerinde çalışılmaktadır (TUCEK 2000). Son zamanlarda hızlandırıcı teknolojisindeki ilerlemelerle birlikte nükleer atık dönüşümü ve enerji üretimi için Hızlandırıcı Gdümlü Sistemlere (HGS) olan ilgi daha da artmıştır (ARTISYUK vd. 2007, GOKHALE vd. 2006).

HIZLANDIRICI GÜDÜMLÜ SİSTEM

Hızlandırıcı Gdümlü Sistem, bir parçacık hızlandırıcısıyla kritikaltı çalışan reaktörün birleştirilmesiyle oluşmuştur. HGS'i 4 bölüme ayırabiliriz. Bunlar; protonları 1 GeV ya da daha fazla enerjilerde hızlandırabilecek süperiletken bir lineer (linak) veya dairesel (siklotron) hızlandırıcı, sisteme parçalanma (spallation) reaksiyonlarıyla nötron sağlamak için ağır bir çekirdekten oluşan hedef, nötronları kullanarak uzun yarı ömürlü fisyon ürünleri ve uranyum ötesi elementlerini dönüştüren kritikaltı reaktör, fisyon ve radyoaktif bozunum yoluyla ortaya çıkan enerjiyi kontrol altına alarak sistemler ve hızlandırıcı için elektrik desteği sağlayan sistemdir (GUDOWSKI 1999, YAPICI vd. 2008). Şekil 1'de HGS'in bölümleri görülmektedir.



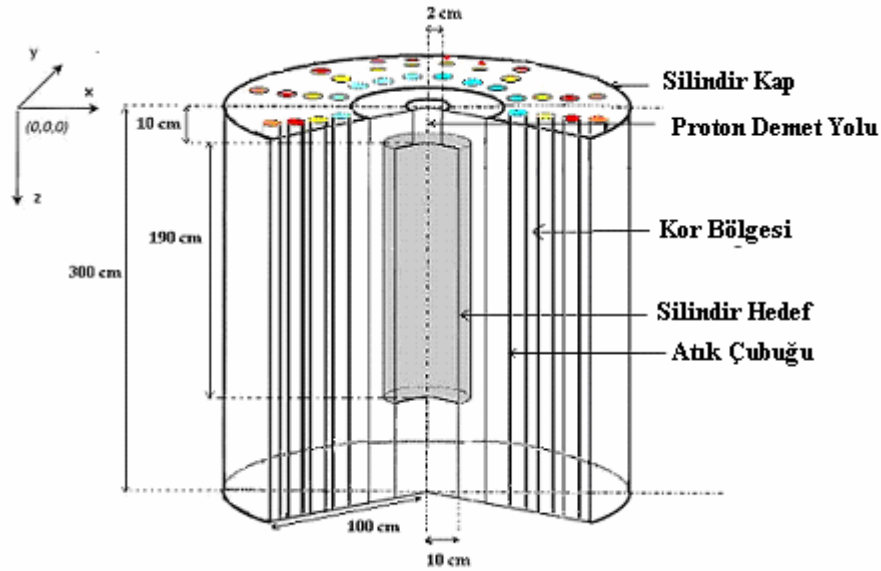
Şekil 1. Hızlandırıcı güdümlü sistemin bölümleri

1 GeV ya da daha fazla enerjili ve istenilen demet akım şiddetine sahip sürekli dalga modunda (CW) çalışan yüksek yoğunluklu proton demeti, ağır bir metalden oluşan hedefe gönderilmektedir. Kritikaltı reaktöre gönderilen proton demeti, parçalanma reaksiyonuyla hedef içinde nükleer çığ ve nükleer reaksiyonları meydana getirerek nötronları üretir (BAETSLE 2001). Nötron üretimi açısından bir çok reaksiyon bulunmasına rağmen nötron üretiminde protonların kullanılması en uygun yoldur.

HGS'ler kritikaltı durumda çalıştıkları için kritiklikle ilgili güvenlik problemlerini ortadan kaldırmıştır. Kritik reaktörlere kıyasla HGS'ler daha fazla nötron üretebilmektedir. Bu nötron fazlalığı fisil yakıt olarak üretimi, nükleer atıkların güvenli ve etkin bir şekilde dönüşümü ve çeviriminde kullanılmaktadır (MUKAIYAMA 1999, TAKIZUKA 1997, TR-04-15 TECHNICAL REPORT 2004).

SİSTEMİN YAPISI

Seçilen beş uzun yarı ömürlü ^{99}Tc , ^{129}I , ^{237}Np , ^{238}U ve ^{239}Pu gibi nükleer atıkların kararlı ya da daha kısa yarı ömürlü izotoplara dönüşümleri incelenmiştir. Bu çalışmada, uzun ömürlü atıkların dönüşüm oranları, sırasıyla 1, 2 ve 3 GeV proton demet enerjileri için proton başına üretilen nötron sayısı (çoğaltma faktörü), nötron akı dağılımları ve güç yoğunluğu hesaplanmıştır. Şekil 2'de sistemin üç boyutlu yapısı görülmektedir.



Şekil 2. HGS'in yapısı

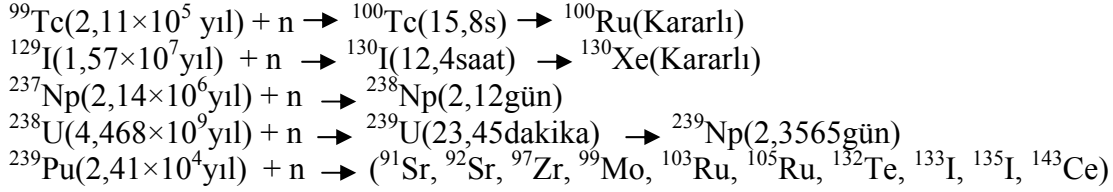
Sistem, 100 cm yarı çaplı silindir bir kap, merkezinde 10 cm yarı çaplı bir silindir kurşun hedef ve etrafında bulunan silindirik atık çubuklarından oluşmuştur. 100 cm yarıçaplı silindir kabın et kalınlığı 2 cm'dir. Kap paslanmaz çelikten yapılmıştır. Silindir kap, 300 cm yüksekliğindedir. Silindir kabın merkezine yerleştirilen kurşun hedefin boyu 190 cm'dir. 10 cm yarıçapındaki hedefin yapı malzemesi doğal kurşundur. Kaynak proton demetinin boyu 10 cm ve yarıçapı 2 cm'dir. Atık çubukları, merkezde bulunan doğal kurşun hedeften dışa doğru simetrik olarak altıgen halkalar şeklinde yerleştirilmiştir. Hedefin etrafına yerleştirilen atık çubuğunun dış yarıçapı 0,430 cm ve iç yarıçapı 0,425 cm'dir. Atık çubukları paslanmaz çelikten yapılmıştır. Atık çubukları hedef ile kap arasındaki bölgede her birinde merkezden dışarı doğru sırasıyla 6, 12, 18, 24 ve 30 adet bulunacak şekilde yerleştirilmiştir. Sistemde toplam 90 atık çubuğu bulunmaktadır. Soğutucu olarak sodyum kullanılmıştır.

HESAPLAMALAR

Sistemin merkezinde bulunan doğal kurşun hedefe, 10 mA demet akımına sahip ve enerjileri sırasıyla 1, 2, 3 GeV olan proton demetleri gönderilmiştir. Bu üç enerji değerleri için proton başına hedefte üretilen nötron sayıları hesaplanmıştır. Şekil 3'de 1, 2 ve 3 GeV proton enerjileri için proton başına üretilen nötron sayısındaki değişim görülmektedir. Proton başına üretilen nötron sayısı demet akımı, demetin enerjisi, hedefin yapıldığı malzeme ve hedefin geometrisine bağlıdır. Hedefe gelen proton, hedef materyal atomunun çekirdeğiyle yaptığı nükleer etkileşimler (Nükleer Çıg, Buharlaştırma) sonucunda hedef içinde nötron üretimi ve nötron yutulma olaylarını meydana getirmektedir (YAPICI vd. 2008).

Hedefe sırasıyla 1, 2 ve 3 GeV enerjili proton demetleri gönderilmiş ve çubuklara yerleştirilen ^{99}Tc , ^{129}I , ^{237}Np , ^{238}U ve ^{239}Pu için halka numarasına göre akıdaki değişim hesaplanmıştır. Şekil 4a-c'de gönderilen 1, 2, 3 GeV enerjili proton demetleri ve atıklar için halka numarasına göre nötron akısındaki değişim görülmektedir.

Tasarlanan bu sistemde sırasıyla hedef etrafındaki atık çubuğu bölgesine yerleştirilen seçilmiş bu beş uzun yarı ömürlü fisyon ürünleri ve minör aktinitlerin fisyon ve nötron yakalama reaksiyonlarıyla kararlı ya da daha kısa yarı ömürlü hale getirmektir. Atık çubuklarına yerleştirmek için fisyon ürünlerinden ^{99}Tc ve ^{129}I , küçük aktinitlerden ise ^{237}Np , ^{238}U ve ^{239}Pu seçilmiştir. Ele alınan aktinit izotopları çok uzun seneler sonucunda kendiliğinden kararlı hale gelebilmektedir. Bu elementlerin dönüşümleri şu reaksiyonlarla olmaktadır.



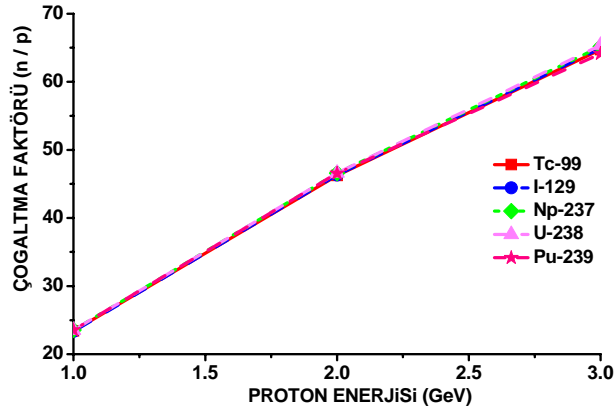
^{99}Tc , ^{129}I , ^{237}Np , ^{238}U ve ^{239}Pu 'un dönüşüm hesaplamaları için bir aylık zaman dilimi seçilmiştir. Hesaplamalarda kullanılan MCNPX (LA-UR-02-2607 2002) bilgisayar kodunda her bir elementin dönüşümünün hesaplanmasında hata paylarını azaltmak için bilgisayar programının çalışma süresi bir saat seçilmiştir. Merkezden dışa doğru x eksenini boyunca sıralanmış atık çubuklarında seçilen bu beş element için dönüşüm hesaplamaları yapıldı.

Tablo 1'de seçilen izotopların dönüşüm oranları görülmektedir. Şekil 5a-c'de 1, 2, 3 GeV enerjili proton demeti ve atıklar için bir aydaki dönüşüm miktarının x-eksenine göre değişimi görülmektedir.

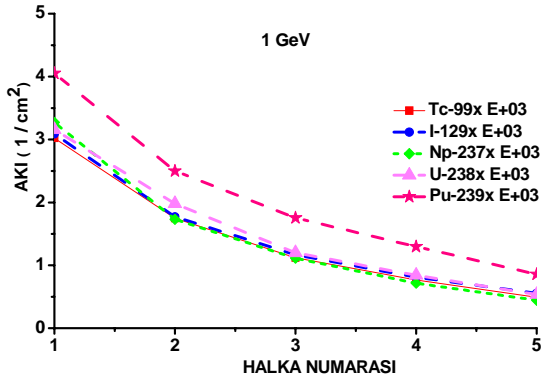
Hedefe gönderilen sırasıyla 1, 2 ve 3 GeV enerjili proton demetleri için atık çubuklarına koyulan farklı malzemelerle x eksenini boyunca meydana gelen güç yoğunluğundaki değişim incelenmiştir. Merkezden 15 cm uzaklıktaki x ekseninden başlayarak yerleştirilmiş atık çubuklarındaki genel güç yoğunluğu azalmıştır. Nötron akılarının merkezden uzaklaştıkça azalması güç yoğunluğunda azalmaya neden olmuştur. Şekil 6a-c'de 1, 2 ve 3 GeV enerjili proton demeti ve ^{99}Tc , ^{129}I , ^{237}Np , ^{238}U , ^{239}Pu atıkları için güç yoğunluğunun x-eksenine göre değişimi görülmektedir.

Tablo 1. ^{99}Tc , ^{129}I , ^{237}Np , ^{238}U ve ^{239}Pu izotoplarının dönüşüm oranları

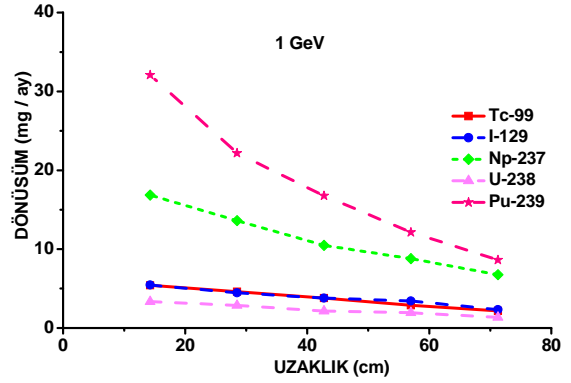
İzotoplar	Başlangıç Miktarı (gr)	Dönüşüm (mg/ay) (1 GeV için)	Dönüşüm (mg/ay) (2 GeV için)	Dönüşüm (mg/ay) (3 GeV için)
^{99}Tc	176193	317,48	1342,68	2695,52
^{129}I	75686,4	326,1	1381,76	2799,38
^{237}Np	310253,4	922,13	3911,61	7826,56
^{238}U	290335,5	200,11	848,02	1680,29
^{239}Pu	303512,4	1444,47	6091,28	12204,77



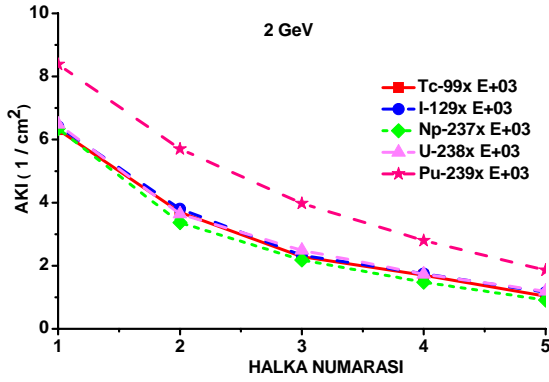
Şekil 3. 1, 2 ve 3 GeV enerjili proton demetleri için proton başına nötron sayısındaki değişim



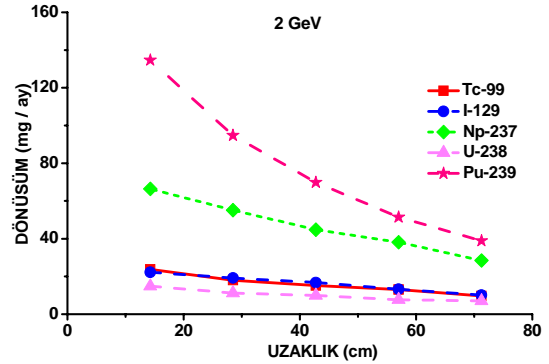
(a)



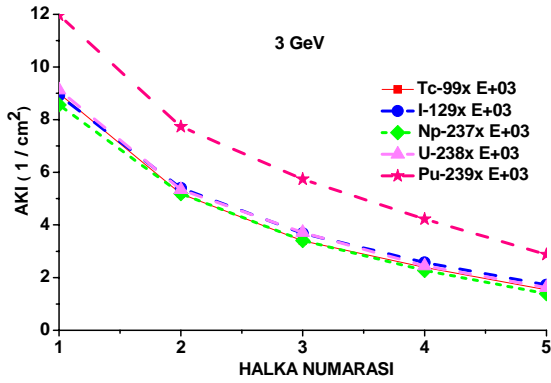
(a)



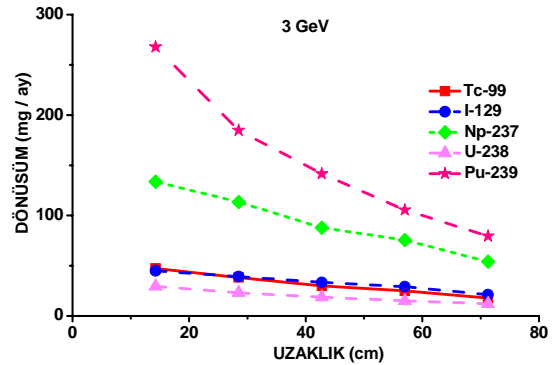
(b)



(b)



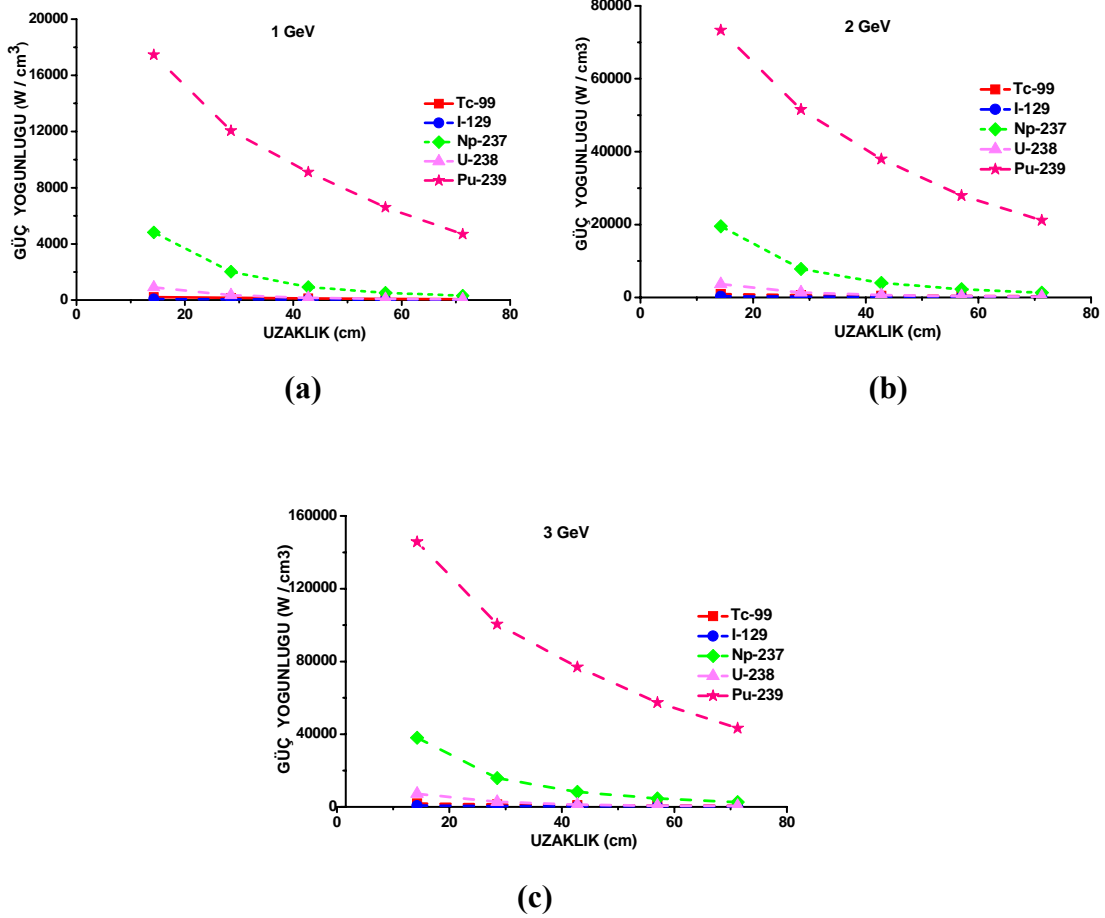
(c)



(c)

Şekil 4a-c. 1, 2, 3 GeV enerjili proton demeti ve ^{99}Tc , ^{129}I , ^{237}Np , ^{238}U , ^{239}Pu atıkları için nötron akısının halka numarasına göre değişimi

Şekil 5a-c. 1, 2, 3 GeV enerjili proton demeti ve ^{99}Tc , ^{129}I , ^{237}Np , ^{238}U , ^{239}Pu atıkları için bir aydaki dönüşüm miktarının x-eksenine göre değişimi



Şekil 6a-c. 1, 2 ve 3 GeV enerjili proton demeti ve ^{99}Tc , ^{129}I , ^{237}Np , ^{238}U , ^{239}Pu atıkları için güç yoğunluğunun x-eksenine göre değişimi

SONUÇ

Hızlandırıcı GÜdümlü Sistem temiz ve güvenli enerji üretimi, harcanmış yakıttan alınan atığın kontrolü ve yok edilmesi ayrıca toryum gibi önemli bir yakıt kaynağını kullanma avantajlarına sahiptir. Bu avantajlar Hızlandırıcı GÜdümlü Sistemin konumunu her geçen gün daha da arttırmaktadır. Yapılan araştırmalar ve geliştirmeler Hızlandırıcı GÜdümlü Sistemin gelecek nesiller için sorun oluşturan atıkların ortadan kaldırılmasında en önemli seçenek olduğunu göstermiştir.

KAYNAKLAR

- ARTISYUK V., BROEDERS C., GONZALEZ-ROMERO E., GUDOWSKI W., IGNATYUK A., KONOBEYEV A., KOROVIN Y., PILNOV G., STANKOVSKIY AND TITARENKO Y., 2007. Challenge of nuclear data for innovative nuclear energy, *Progress in Nuclear Energy Studgorodok*, Obninsk 249040, Russia. 50, pp. 341-346.
- BAETSLE LH, 2001. Application of Partitioning / Transmutation of Radioactive Materials in Radioactive Waste Management, Nuclear Research Centre of Belgium Sck/Cen, Mol, Belgium.
- GARWIN RL. CHARPAK G., 2001. Megawatts and megatons a turning point in the nuclear ages? New York: Alfred A. Knopf.
- GOKHALE PA., DEOKATTEY S. AND KUMAR V., 2006. Accelerator driven systems (ADS) for energy production and waste transmutation: International trends in R&D, *Progress in Nuclear Energy*, 48, pp. 91-102.
- GUDOWSKI W, 1999. Accelerator-Driven Transmutation Projects. *The Importance of Nuclear Physics Research for Waste Transmutation*, Sweden. pp. 436c-457c.
- LA-UR-02-2607, 2002. MCNPX User's Manual Version 2.3.0.
- MUKAIYAMA T, 1999. Omega Program in Japan And ADS Development at JAERI, Center for Neutron Science, Japan Atomic Energy Research Institute Tokai-mura, Ibaraki-ken Japan. pp. 319-1195.
- RUBBIA C, RUBIO JA, BUONO S, CARMINATI F, FIÉTIER N, GALVEZ J, GELÉS C, KADI Y, KLAPISCH R, MANDRILLON P, REVAL JP AND ROCHE CH, 1995. *Conceptual Design of a Fast Neutron Operated High Power Energy Amplifier*, CERN/AT/95-44 (ET), 29th September.
- SALVATORES M., 2005. Nuclear fuel cycle strategies including partitioning and transmutation. *Nuclear Engineering and Design*, 235, 805–816.
- TAKIZUKA T, 1997. Report IAEA-TECDOC, 985, p. 87.
- TOSHINOBU S., OIGAWA H., TSUJIMOTO K., NISHIHARA K., KIKUCHI K., KURATA Y., SAITO S., FUTAKAWA M., UMENO M., OUCHI N., ARAI Y., MINATO K. AND TAKANO H., 2003. Research and development on accelerator-driven transmutation at JAERI, *Japan Atomic Energy Research Institute*, 2-4, Shirakata-Shirane, Tokai, Ibaraki Japan. pp. 319-1195.
- TRELLUE HR, 2003. Reduction of the Radiotoxicity of Spent Nuclear Fuel Using a Two-Tiered System Comprised of Light Water Reactors and Accelerator-Driven Systems, New Mexico.
- TR-04-15 TECHNICAL REPORT, 2004. Partitioning and Transmutation Current Developments.
- TUCEK K, 2000. Burnable Poisons in Sub-Critical Cores Dedicated to Radiotoxic Waste Transmutation, Royal Institute of Technology, Stockholm.
- YAPICI H., GENÇ G., DEMİR N., 2008. A comprehensive study on neutronics of a lead–bismuth eutectic cooled accelerator-driven sub-critical system for long-lived fission product transmutation. *Annals of Nuclear Energy*, 35, 1264–1273.