



ABSOLUTE YIELD DETERMINATION OF A 14 - MeV NEUTRON GENERATOR

Derya YILMAZ BAYSOY*¹, Atilla İskender REYHANCAN², Metin SUBAŞI¹

¹Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen-Edebiyat Fakültesi, Fizik Bölümü, Esenler-İSTANBUL

²ÇNAEM, Fizik Bölümü, P.K.1 Atatürk Havalimanı, İSTANBUL

Received/Geliş: 29.09.2009 Revised/Düzeltilme: 27.04.2010 Accepted/Kabul: 13.05.2010

ABSTRACT

In this work absolute neutron yield of a neutron generator was determined using the associated particle method. The experiments were carried out on the SAMES J-15 neutron generator in the fast neutron physics laboratory of the Physics Department at Çekmece Nuclear Research Center. The 14-MeV neutrons were obtained through the $^3\text{H}(d,n)^4\text{He}$ reaction by bombarding a solid tritium target with 150 keV deuterons. In the measurements, alpha particles, which are produced simultaneously with the 14 -MeV neutrons in the D-T reaction, were counted by a small surface barrier detector placed at 90° with respect to the deuteron beam in the evacuated target chamber. In order to prevent the damage due to fast neutrons and deuterons scattered from the target the detector was covered with a thin Al- foil (0,77 μm) and placed 24 cm away from the target. In evaluating the 14-MeV neutron yield; contribution of D-D neutrons due to the build-up deuterons on the tritium target was taken into account by counting the tritons from the $^3\text{H}(d,t)^3\text{He}$ reaction, which occurs simultaneously from the $^3\text{H}(d,n)^4\text{He}$ reaction in the target.

For comparison, neutron yield was also determined with the neutron activation technique using $^{27}\text{Al}(n,p)^{27}\text{Mg}$ standard reaction. The results were found to be consistent with each other within the experimental uncertainties.

Keywords: D-T neutron, associated particle method, Sames J-15.

PACS numbers/numaraları: 29.25.Dz, 82.80.Jp, 52.70.Nc, 29.30.Ep, 52.55.Pi, 29.30.Kv

BİR D-T NÖTRON ÜRETECİNDE NÖTRON AKISININ MUTLAK BELİRLENMESİ

ÖZET

Bu çalışmada, bir nötron jeneratörünün mutlak verimi ortak tanecik yöntemi kullanılarak belirlenmiştir. Deneyler Çekmece Nükleer Araştırma Merkezi Fizik Bölümü hızlandırıcı laboratuvarındaki Sames J-15 nötron üreticinde yapılmış, 14- MeV enerjili nötronlar katı bir trityum hedefin 150 keV enerjili döteronlarla bombardımanı sonucu oluşan $^3\text{H}(d,n)^4\text{He}$ reaksiyonundan elde edilmiştir. Ölçümlerde bu reaksiyondan 14-MeV nötronlar ile eş zamanlı üretilen alfa parçacıkları vakum altında bulunan hedef odasında döteron hızmesine 90° lik doğrultuda yerleştirilen küçük bir yüzey engelli detektör ile sayılmıştır. Hızlı nötronların ve hedeften saçılan döteronların etkilerinden korumak için, alfa detektörü, 0,77 μm kalınlığında Al-folyo ile kaplanmış ve hedeften 24 cm uzağa yerleştirilmiştir. 14-MeV nötronların verimi hesaplanırken trityum hedefte döteronların birikmesinden dolayı oluşan D-D nötronların katkısı göz önüne alınmış, $^3\text{H}(d,t)^3\text{He}$ reaksiyonundan gelen tritonlar $^3\text{H}(d,n)^4\text{He}$ reaksiyonundan çıkan alfa parçacıklarıyla eş zamanlı olarak sayılmıştır.

Karşılaştırma amacıyla, nötron verimi $^{27}\text{Al}(n,p)^{27}\text{Mg}$ standart reaksiyonu kullanılarak nötron aktivasyon tekniği ile de ölçülmüş, sonuçların deneysel belirsizlik sınırları içinde birbirleriyle uyumlu oldukları bulunmuştur.

Anahtar Sözcükler: Ortak tanecik yöntemi, D-T nötron, Sames J-15.

*Corresponding Author/Sorumlu Yazar: e-mail/e-ileti: dyilmazbaysoy@gmail.com, tel: (212) 383 42 34

1. GİRİŞ

Nötron-madde etkileşmelerinin nicelenmesinde en önemli parametrelerden birisi deneyler sırasında kullanılan nötronların sayısıdır. Özellikle, nötron etkileşmelerinin meydana gelme olasılıklarının (tesir kesitleri) doğru ve duyarlı belirlenmesi, bu parametrenin ne kadar doğru ve duyarlı ölçüldüğüne bağlıdır. Nötron kaynağının bir hızlandırıcının hedefi olması halinde bu parametrenin ölçülmesi daha fazla dikkat ve titizlik gerektirir. Bu nedenle bu tür nötron üreteçleri için deneyler sırasında (in-beam) veya deneylerden önce (off-beam) nötron verimi mutlaka belirlenmektedir. Bugüne kadar, bu tip kaynakların nötron veriminin ölçülmesinde çeşitli yöntemler denenmiş ve bunlarla ilgili pek çok makale yayımlanmıştır. En yaygın kullanılan yöntemler, nötronlarla ışınıldıktan sonra bir örnekte indüklenen β ve γ -ışınlarının sayımına dayanan ‘Aktivasyon Yöntemi’ ile etkileşme sırasında nötronlarla birlikte eş-zamanlı üretilen yüklü parçacıkların sayımına dayanan ‘ortak tanecik sayma’ (Associated Particle Method, APM) yöntemleridir [1]. İlki, nötron tesir kesiti çok iyi bilinen bir malzemenin (standart malzeme) ışınlanması sonucunda oluşan aktivitenin sonradan ölçülmesine dayandığı için ‘görelî ölçüm’ olarak, diğeri ise, ışınlanma anında reaksiyon ürünlerinin saptanmasını içerdiği için ‘doğrudan ölçüm veya mutlak ölçüm’ olarak isimlendirilmektedir. Daha güvenli ve daha duyarlı olduğu bilinen ortak tanecik sayma yöntemi ile nötron sayısının belirlenmesi ile ilgili çalışmalar Benveniste, J. vd. nin 1954 yılında gazlı detektörle yaptığı çalışmayla başlamıştır [2, 3]. O günden beri, gerek yöntemle, gerekse uygulamaları ile ilgili pek çok çalışma yapılmış ve yayımlanmıştır[4-8]. Örneğin, gelişen teknoloji ile birlikte, verim ve ayırım gücü daha yüksek detektörlerin üretiliyor olması bu yöntemin daha doğru ve duyarlı sonuçlar vermesini olanaklı kılmış, bunun sonucu olarak, yüklü parçacıkların %100 verimli bir yüzey engelli katı-hal detektörü ile ölçülmesi, ortak parçacığın yanı sıra reaksiyondan gelen diğeri yüklü parçacıkların da sayımına olanak sağlayarak ölçümlerdeki deneysel belirsizliklerin azaltılmasına katkıda bulunmuştur [9].

Bu çalışmanın amacı, yaygın olarak kullanılan bu iki yöntemi aynı anda uygulayarak hızlandırıcı tipi bir nötron üreticinin (14 MeV-Nötron Generator), verimini optimum yapıda bir deney sistemi oluşturarak belirlemek, sonuçlarını ve duyarlılıklarını karşılaştırarak üstünlüklerini ya da eksikliklerini ortaya koymaktır.

2. ORTAK TANECİK SAYMA YÖNTEMİ

Yukarıdaki paragrafta ifade edildiği gibi, ortak tanecik sayma yöntemi, bir nükleer reaksiyonda, nötronlarla birlikte eş zamanlı olarak üretilen yüklü taneciklerin sayımı olarak tanımlanır. Alçak enerjili bir hızlandırıcıda (Sames J-15) 150 keV enerjili döteronlarla dövülen bir trityum hedefte oluşan ${}^3\text{H}(d,n){}^4\text{He}$ reaksiyonunda ~ 14 MeV enerjili nötronlarla eş zamanlı olarak yayınlanan yüklü tanecikler ~ 3.5 MeV enerjili alfalardır. Hedefte üretilen ve α detektörüne gelen α -parçacıklarının sayıları ile bunlarla eş-zamanlı üretilen nötronların sayıları arasında

$$N_n = N_a (4\pi/\Omega) R(E_d, \Theta_a) \quad (1)$$

ilişkisi vardır.

Burada Ω alfa detektörünün hedefi gördüğü katı açıyı, $R(E_d, \Theta_a)$ ise, döteronun enerjisine (E_d) ve gelen döteron hızıyla α - parçacıklarının yaptığı yayımın açısına (Θ_a) bağlı olan ‘anizotropi’ faktörüdür. Aslında, α - yayımının farklı açılarda farklı yayınlanma eğiliminde olmasından dolayı oluşan farklılığı düzeltme amacını taşıyan bu faktör

$$R(E_d, \Theta_a) = \frac{\int \sigma(E) n(E) (dE/dx)^{-1} dE}{\int \sigma(E) n(E) (dw_{cm}/dw_{lab})(dE/dx)^{-1} dE} \quad (2)$$

şeklinde tanımlanır [10]. Bu ifadede,

$\sigma(E)$: kütle merkezi (CM) sisteminde (d-t) reaksiyonu diferansiyel tesir kesiti

dE/dx : Döteronların hedef malzemesi içinde enerji kayıp (hızı) oranı (stopping power)

$n(E)$: hedefte, döteron enerjisinin izin verdiği derinliğe kadar mevcut trityum atom yoğunluğu,

dw_{cm}/dw_{lab} : kütle merkezi (CM) sisteminden laboratuvar (LAB) sistemine katı açılı çevirme faktörü olup

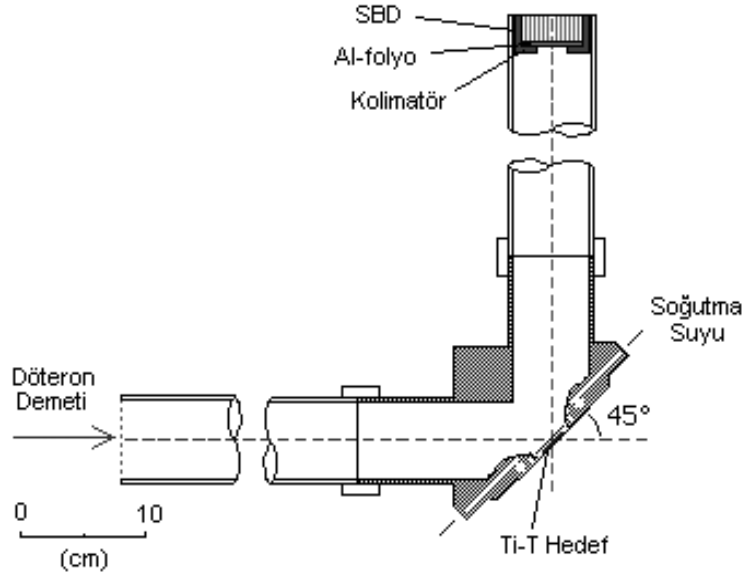
$$\frac{dw_{cm}}{dw_{lab}} = \frac{b(\cos \Theta + (1/b^2 - \sin^2 \Theta)^{1/2})^2}{(1/b^2 - \sin^2 \Theta)^{1/2}} \quad (3)$$

olarak verilir[3,9]. Döteron hüzmesine göre 90° açılı yapacak şekilde yerleştirilmiş bir α -dedektörü halinde, katı açılı çevirme faktörü yaklaşık olarak 1 (bir)'e eşittir [3]. Dolayısıyla, hesaplamalarda kolaylık sağlamak amacıyla bu çalışmada $\Theta=90^\circ$ seçilmiştir.

3. DENEYSEL ÇALIŞMA

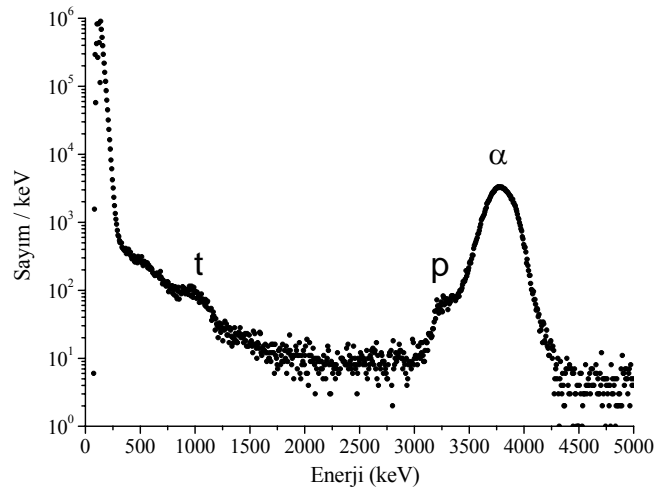
${}^3\text{H}(d,n){}^4\text{He}$ tepkileşimi sonucu oluşan 14.1 MeV enerjili nötronların sayısının bu tepkileşimden nötronlarla eş zamanlı olarak ortaya çıkan alfa parçacıklarının sayımı ile belirlenebilmesi için, Sames J-15 alçak enerjili iyon hızlandırıcısına bir ortak tanecik hedef odası eklenmiştir. Sames J-15 nötron jeneratörü için oluşturulan hedef odası Şekil 1 de şematik olarak gösterilmiştir. Trityum içeren katı hedef (TiT) döteron hüzmesine 45° açılı ile yerleştirilmiş, böylece, α -dedektörü ile gelen döteron hüzmesi arasındaki açılı 90° olarak tespit edilmiştir. Alfa dedektörü olarak, Ortec firması tarafından üretilen, 100 mm^2 aktif yüzeye sahip bir yüzey engelli silisyum yarı iletken dedektör (Surface Barrier Detector, SBD) seçilmiş ve hedeften 24 cm uzaklığa yerleştirilmiştir.

Bu dedektörün enerji kalibrasyonu, dedektör hızlandırıcıya bağlanmadan önce, ayrı bir vakum odasında, ${}^{239}\text{Pu}$, ${}^{241}\text{Am}$, ${}^{244}\text{Cm}$ izotoplarını içeren, 7 mm aktif çapa sahip ve dakikada $1,76 \cdot 10^5$ alfa parçacığı yayan bir alfa kaynağı kullanılarak yapılmıştır [11,12].

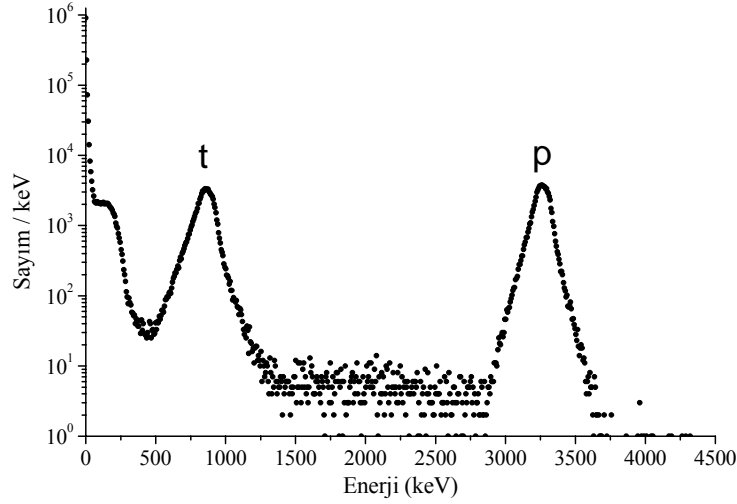


Şekil 1. Ortak tanecik hedef odası

Tritiyum hedefin döteron hüzmesiyle bombardıman edilmesi sırasında SBD detektörü ile alınan ortak tanecik spektrumu Şekil 2’ de verilmiştir. Bu spektrumda sadece alfa parçacıklarının değil, aynı zamanda hızlandırılan döteronların zamanla hedef üzerinde birikmesinden dolayı oluşan d-d tepkileşimlerinden gelen proton ve triton gibi taneciklerin, hatta hedeften Coulomb saçılmasıyla gelen döteronların da bulunduğu görülmektedir. Ancak, döteronlar gibi ${}^3\text{He}$ (0,782 MeV) tanecikleri de gürültü seviyesinin (background) altında kalmaları nedeniyle gözlenmemektedir.



Şekil 2. Tritiyum hedefin döteron hüzmesi ile bombardıman edilmesi sonucu SBD detektörü ile elde edilen yüklü parçacık spektrumu



Şekil 3. Boş bakır hedefin döteron huzmesi ile bombardıman edilmesi sonucu SBD detektörü ile elde edilen yüklü parçacık spektrumu

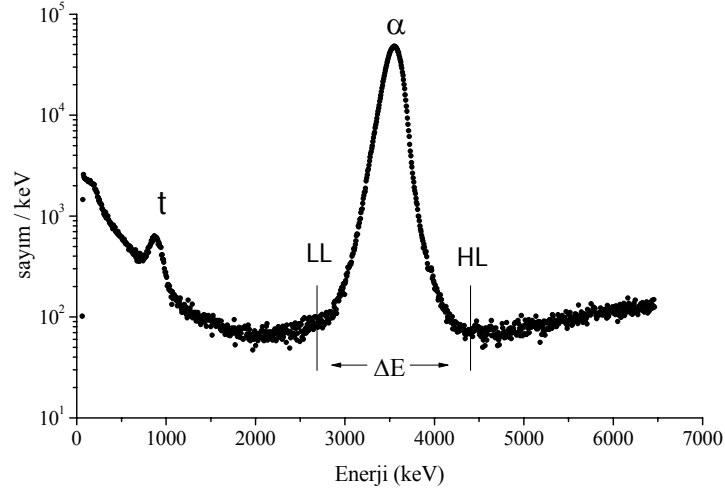
Şekil 3' de ise trityum hedef yerine boş bir bakır hedef konularak elde edilen yüklü parçacık spektrumu verilmiştir. Bu spektrum, döteronların hedef üzerinde birikme yapmasına yetecek kadar bir süre ışınlama yapıldıktan sonra meydana gelen $^2\text{H}(d,n)^3\text{He}$ ve $^2\text{H}(d,p)^3\text{H}$ tepkileşimlerinden ortaya çıkan yüklü taneciklerden oluşmaktadır. Bu spektrum alınmadan önce, SBD detektörü 0,77 μm kalınlığında alüminyum folyo ile kaplanmış ve 8 mm iç çapa sahip olan 12 mm uzunluğundaki bir kolimatör, hedef ile detektör arasında yerleştirilmiştir. Alüminyum folyo yüklü parçacıkların enerji kaybetmelerine de sebep olduğundan, spektrumda alçak enerjili tanecikler (^3He) gözlenememektedir. Bu nedenle, sadece proton ve triton taneciklerine ait tepelerin (photopeaks) net olarak ayırt edilebildiği görülmektedir.

Spektrumdaki tepelerin hangi parçacıklara ait olduğunu belirlemek için, 0,77 μm kalınlığındaki alüminyum folyodan geçen alfa, proton, triton ve ^3He parçacıklarının enerji kayıpları hesaplanmış ve sırasıyla 0,16 MeV, 0,017 MeV, 0,066 MeV ve 0,28 MeV olarak belirlenmiştir. Böylece SBD detektöre gelen parçacıkların beklenen enerjileri sırasıyla 3,389 MeV, 3,044 MeV, 0,905 MeV ve 0,501 MeV olarak bulunmuştur.

Deneylerde alfa parçacıklarının sayımı için çok kanallı sayım (Multi Channel Scaling, MCS) yöntemi uygulanmıştır. Bu amaçla kullanılan tek kanallı analizörün (Single Channel Analyzer, SCA) kalibrasyonu ise, aynı anda SBD detektörüne gelen alfa parçacıklarının Canberra model 85 çok kanallı analizörü (Multi Channel Analyzer, MCA) kullanılarak alınan ve Şekil 4' te örneklenen spektrumundan yararlanılarak yapılmıştır. Bu spektruma göre alt enerji seviyesi (LL) ve pencere aralığı (ΔE) belirlenmiş ve detektöre gelen sinyaller ile SCA penceresi arasında 1 saniyelik gecikme olduğu görülerek düzeltilmiştir. Ayrıca alınan sayımlar çok kanallı analizörde her kanala 1 saniye aralığında gelecek şekilde ayarlanmıştır. Ancak belirlenen enerji aralığında d-d tepkileşiminden gelen protonlarında katkısı bulunduğundan tritonlara ait tepe (pik) alanı belirlenerek protonların spektrumda görülen alfa tepesi alanına katkısı bulunmuştur. Böylece alfa tepe alanının alfa ve protondan oluşan tepe alanına oranı hesaplanarak (0,99) ölçülen alfa parçacıklarının sayısında düzeltme yapılmıştır.

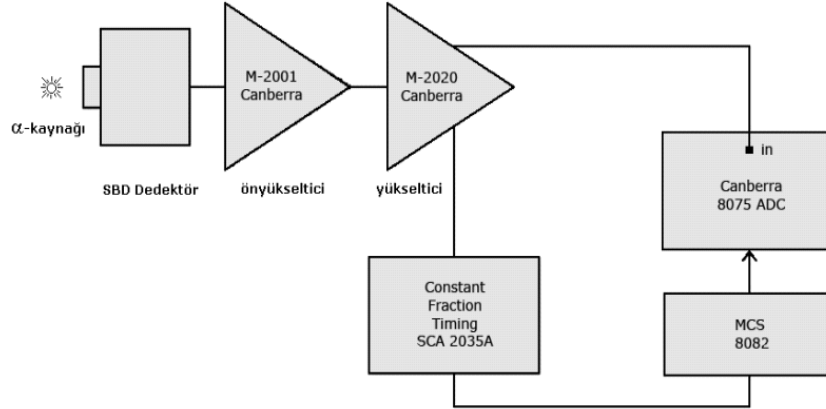
Bu çalışmada ortak tanecik yöntemiyle elde edilen sonuçların doğruluğundan emin olmak için eş zamanlı olarak başka bir yöntemin de -nötron aktivasyon yönteminin- uygulandığı deneyler yapılmıştır. Bu amaçla, deneyler öncesinde, SBD' ün hedefe göre zıt tarafına, hedef

odasının duvarı dışına, % 99,85 saflıktaki bir Al_2O_3 diski yerleştirilmiştir. Şekil 5 alfa parçacıklarının sayımında kullanılan elektronik düzeneği, Şekil 6 ise alfa parçacıkları için alınan tipik bir MCS spektrumunu göstermektedir.

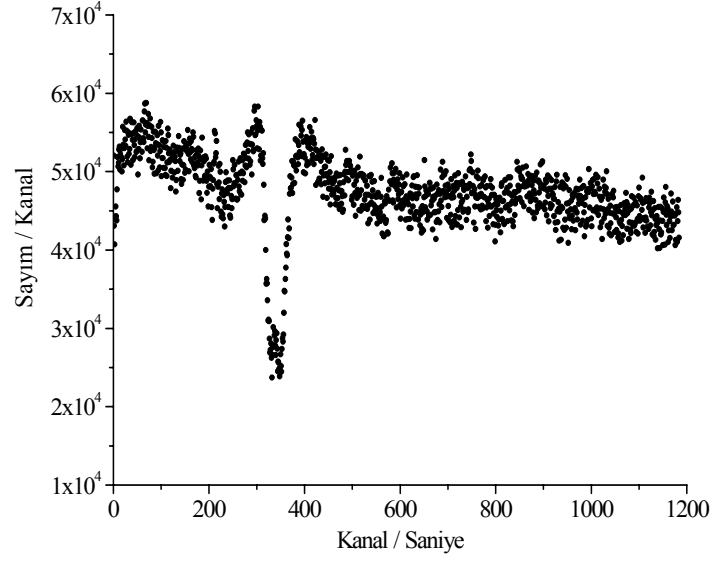


Şekil 4. SCA'nın kalibrasyonunun için trityum hedefin döteron huzmesiyle bombardımanı sırasında SBD ile alınan yüklü parçacık spektrumu.

Alfa parçacıklarının sayımı sırasında ışınlanan Al_2O_3 örneğinin gama aktivitesinin ölçümü için Canberra firması tarafından üretilen 49,5 mm çaplı, $19,4 \text{ cm}^2$ aktif yüzeye sahip olan bir eş eksenli HPGe detektör kullanılmıştır. Bu detektörden gelen sinyalleri Canberra S-85 MCA çok kanallı analizöre iletmek için Canberra model 2003B ön yükseltici, Canberra model 2020 yükseltici ve Canberra model 8075 ADC sisteme eklenmiştir. HPGe detektörün enerji ve verim kalibrasyonu, Al_2O_3 örneğin ışınlanmasından önce standart gama kaynakları (^{60}Co , ^{57}Co , ^{137}Cs , ^{54}Mn , ^{22}Na , ^{133}Ba) kullanılarak yapılmıştır.



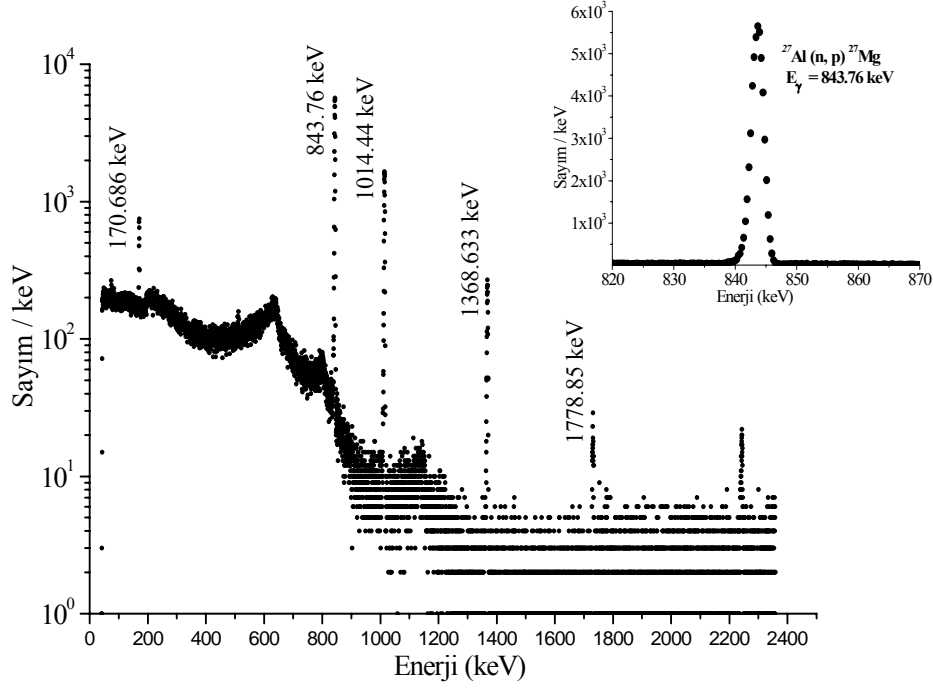
Şekil 5. T(d, n)α tepkileşiminde ortak tanecik (alfa parçacıkları) sayımı sistemi.



Şekil 6. Alfa parçacıklarının MCS spektrumu

Al_2O_3 örnek, alfa parçacıklarının sayımı biter bitmez ışınlama yerinden alınmış, $^{27}\text{Al}(n,p)^{27}\text{Mg}$ reaksiyonu ile üretilen ^{27}Mg çekirdeğinden bozulan 844 keV enerjili gamaların ölçülmesi için HPGe detektörü önüne getirilmiştir. Dedektör ile örnek arasındaki uzaklık 36.3 mm dir ve HPGe detektörün enerji kalibrasyonu da aynı uzaklıktan yapılmıştır. Ölçümler sonucunda çok kanallı analizörde görülen spektrumdan (Şekil 7) 844 keV enerjili gamalar için tüm enerji tepesi altındaki net alan belirlenerek nötron akısı hesaplanmıştır [1,13,14].

HPGe detektörünün verim tayini ve gerçek sayım deneylerinde kullanılan katı açılarının hesaplanmasında, daha önce ÇNAEM Fizik Bölümünde geliştirilen bir bilgisayar programından yararlanılmıştır [15]. Nötron aktivasyon yönteminin uygulanmasında gerekli ölü zaman düzeltmesi ve darbe yığılım (pile-up) düzeltmesi yapılmış [1]; ayrıca, ışınlama süresince akının değişmediği varsayılarak belirlenen nötron akısında, gerçekte rastgele değişimler olabileceğinden, ışınlama sırasında kullanılan nötron akı monitör sonuçları kullanılarak akı için düzeltme faktörü hesaplanarak ortalama nötron akısı belirlenmiştir [13].



Şekil 7. 14MeV nötronlarla ışınlanan Al_2O_3 örneğin gama spektrumu

4. SONUÇ VE TARTIŞMA

Bu çalışmada ortak tanecik yöntemi kullanılarak, $^3\text{H}(d,n)^4\text{He}$ tepkileşiminden çıkan alfa parçacıklarının sayımı yapılarak aynı tepkileşimden çıkan 14,1 MeV nötronların sayısı bulunmuştur. Yapılan deneylerde alfa parçacıklarının sayımı ile aynı zamanda, hedef üzerinde döteron birikmesi sonucu oluşan proton ve triton parçacıklarının sayımı da gerçekleştirilmiştir. Böylece döteron birikmesiyle oluşan $^2\text{H}(d,n)^3\text{He}$ tepkileşimi sonucu ortaya çıkan nötronların sayıları da belirlenmiştir.

MCS yöntemi kullanılarak $^3\text{H}(d,n)^4\text{He}$ tepkileşiminden gelen alfa parçacıkları için doğrudan sayım yapılmıştır. Bu sayım için seçilen enerji aralığında bulunan ($^2\text{H}(d,p)^3\text{H}$ tepkileşiminden gelen) protonların alfa parçacıklarının sayısına katkısı ise tritonların sayısının bulunmasıyla belirlenmiştir. Böylece alfa parçacıklarının sayısında gerekli düzeltme yapılmıştır. Ortak tanecik sayma yöntemiyle 14,1 MeV enerjili nötronların sayısının bulunmasındaki belirsizlikler Çizelge 1 de verilmektedir. Çizelge 2 de ise bu yöntemle eş zamanlı olarak uygulanan nötron aktivasyon yöntemiyle nötron sayısının bulunmasındaki belirsizlikler verilmektedir. Bu belirsizlikler, daha önce sözü edilen düzeltmeler sırasında yapılan hatalar ve kullanılan nükleer verilerde verilen belirsizlikler gözönüne alınarak hesaplanmıştır.

Çizelge 1. Nötron sayısının ortak tanecik yöntemiyle bulunmasındaki belirsizlikler

$R(E_d, \Theta_a)$ 'nın belirlenmesinde;	belirsizlik (%)
• döteron huzmesinin moleküler yapıda olması nedeniyle	∓ 1
• trityum hedefte homojen olmayan trityum dağılımı nedeniyle	$\mp 0,5$
α detektörün katı açısı hesabında	∓ 2
α taneciklerinin sayımında	-
Toplam	$\mp 2,3$

Çizelge 2. Nötron sayısının nötron aktivasyon yöntemiyle bulunmasındaki belirsizlikler

844 keV enerjili gamalar için pik alanı, P(E), hesaplanmasında	belirsizlik (%)
	$\mp 0,47$
Al_2O_3 örnekte hedef çekirdek sayısının, (n), bulunmasında	$\mp 0,1$
Tepkileşim kesiti verisinde, (σ),	$\mp 4,7$
HPGe detektörün verimin belirlenmesinde (\mathcal{E})	∓ 2
Çekirdek Bozunum sabiti, (f), verisinde	$\mp 0,4$
Sayım katı açısının (Ω) belirlenmesinde	∓ 1
Zaman faktörünün, (z), belirlenmesinde	$\mp 0,1$
Toplam	$\mp 5,2$

Trityum hedeften çıkan 14,1 MeV nötronların sayısı ortak tanecik yöntemiyle % 2,3 belirsizlikle bulunmuştur. Bu da, nötron aktivasyon yöntemiyle karşılaştırıldığında, ortak tanecik yönteminin nötron sayısının belirlenmesinde daha duyarlı bir yöntem olduğunu göstermektedir. Ortak tanecik ve nötron aktivasyon yöntemiyle elde edilen tipik değerler (nötron/s) Çizelge 3 de verilmektedir. Sonuçlar karşılaştırıldığında aralarındaki farkın %2 den az olduğu görülmektedir. İki ayrı nötron verim ölçüm metodu arasındaki bu uyum, alfa parçacıkları sayım sistemimizin nötron verimini doğru ve duyarlı bir şekilde izlemeye olanak sağladığını göstermektedir. Ayrıca, döteryumun hedef üzerinde birikmesinin de nötron verimine fazla bir etkisi olmadığı anlaşılmaktadır.

Çizelge 3. Ortak tanecik sayma ve nötron aktivasyon yöntemleriyle elde edilen sonuçların karşılaştırılması

Hedef	Döteron enerjisi (MeV)	14,1 MeV nötronların sayısı (n/s)		Sonuçlar arasındaki fark
		Ortak tanecik sayma yöntemine göre	Nötron aktivasyon yöntemine göre	
$T_i T$	0,150	$8,174 \cdot 10^8$	$8,001 \cdot 10^8$	%2

REFERENCES / KAYNAKLAR

- [1] Knoll, G., "Radiation Detection and Measurements", John Willey and Sons, 3rd ed. New York, 1999.
- [2] Benveniste, J. and Zenger, J., "Information on the Neutrons Produced in the ^3H (d,n) ^4He Reaction" UCRL-4266, 1954.
- [3] Benveniste, J., Mitchell, A.C., Schrader, C.D. and Zenger, J.H., "The Problem of Measuring The Absolute Yield of 14-MeV Neutrons By Means of An Alpha Counter", Nuclear Instruments and Methods 7, 306-314, North-Holland Publishing Company, 1960.
- [4] Petö, G. C., "Prospects of Imaging by Associated Particle Timing with D+D and D+T Neutrons" *Appl. Radiat. Isot.* 49, 5/6, 553-554, 1998.
- [5] Carasco, C., Perot, B., Mariani, A., et. al., "Material Characterization in Cemented Radioactive Waste with the Associated Particle Technique", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, Article in Press.
- [6] Carasco, C., Perot, B., Bernard, S., et. al., "In-Field Tests of the EURITRACK Tagged Neutron Inspection System", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 588, 397-405, 2008
- [7] Sudac, D., Blagus, S., Valkovic, V., "Inspections for Contraband in a Shipping Container Using Fast Neutrons and the Associated Alpha Particle Technique: Proof of Principle", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B, 241, 798-803, 2005.
- [8] Hausladen, P.A., Neal, J.S., Mihalcz, J.T., "An alpha particle detector for a portable neutron generator for the Nuclear Materials Identification System (NMIS)", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B : Beam Interactions with Materials and Atoms, 241, 1-4, 835-838, 2005.
- [9] Subasi, M. "Absolute neutron yield determination of an accelerator neutron source by using associated particle method". Ç.N.A.E.M. A.R-247, 1988.
- [10] Ruby, I. and Crawford, R. B., "Anisotropy Factors for the Determination of Total Neutron Yield from the $\text{D}(d,n)\text{He}^3$ and $\text{T}(d,n)\text{He}^3$ Reactions" Nuclear Instruments and Methods 24, 413-417, North-Holland Publishing Company, 1963.
- [11] Amersham Laboratories, "Certificate of Calibration Of Alpha Emitting Radioactive Reference Source", Alpha reference sources test report-AMR43, Amersham International pic., UK
- [12] EG&G ORTEC, "Quality Assurance Data Sheet UltraTM Alpha Dedector", Tennessee, USA, 1993.
- [13] Subaşı, M., Erduran, N., Tarcan, G., Özbir, Y., Baykal, A., Gültekin, E. ve Ercan, A., "Alçak Enerjili Bir İyon Hızlandırıcısında Mutlak Nötron Akısının Aktivasyon Yöntemiyle Belirlenmesi", Ç.N.A.E.M. A.R.-249, 1996.
- [14] Debertin, K., and Helmer, R.G., "Gamma – and X – Ray spectrometry with Semiconductor detectors", Elsevier Science Publishers B.V, New York, 1988.
- [15] Bostan, M., Erduran, N. ve Ercan, A., "Silindir şeklindeki Örneklerin Gama Aktivitelerinin Belirlenmesinde Öz Soğurma ve Katı Açık Etkenlerinin İncelenmesi", Ç.N.A.E.M. A.R-250, 1988.