



**NÖTRON AKTİVASYON ANALİZİ
İLE MADDE TAYİNİ
Niyazi Meriç
Yüksek Lisans Tezi
Fizik Anabilim Dalı
1990**

ANKARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

NÖTRON AKTİVASYON ANALİZİ İLE MADDE TAYİNİ

Niyazi Meriç

YÜKSEK LİSANS TEZİ
FİZİK ANABİLİM DALI

Y. Ö.
Yükseköğretim Kurulu
Dokümantasyon Merkez'

Bu Tez 8-3-1990 Tarihinde Aşağıdaki Jüri Tarafından yüz (100)

Not Takdir Edilerek oybirliği ile Kabul Edilmiştir

Prof.Dr.Nuray Büget Prof.Dr.Cevdet Tezcan Doç.Dr.Tülay Yeşin
Danışman Başkan Üye

N. Büget

C. Tezcan

T. Yeşin

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

NÖTRON AKTİVASYON ANALİZİ İLE MADDE TAYİNİ

Niyazi Meriç

Ankara Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Fizik Anabilim Dalı

Danışman : Prof. Dr. Nuray Büğet

1990, Sayfa :59

Jüri : Prof. Dr. Nuray Büğet

Prof.Dr.Cevdet Tezcan

Doç.Dr.Tülay Yeşin

Bu çalışmada, karmaşık yapılı dört ayrı toprak numunesinin, nötron aktivasyon yöntemi ile, nitel ve nicel analizi yapıldı . Madde miktarının saptanması için *Kıyaslama Tekniği* nden yararlanılan deneylerde standart olarak OKA-2 Toryum Britolit cevheri, numune olarak da Eskişehir'in Kızılcaören yöresinden alınan KTS-1, KTS-2, KTS-3 ve KTS-4 kod numaralı topraklar kullanıldı . Germanyum dedektörlü gama spektrometreleri ve bilgisayar programları yardımıyla elde edilen madde miktarları daha önceki çalışmalarda bulunanlarla kıyaslandı . Sonuçların, Demir ve Europyum dışındaki elementler için tutarlı olduğu saptandı

ANAHTAR KELİMELER : Gama spektrumlarının Analizi, Nötron Aktivasyon Analizi, Nadir Toprak Elementler.

ABSTRACT

Masters Thesis

DETERMINATION OF THE AMOUNT OF ELEMENTS BY "NEUTRON ACTIVATION ANALYSIS"

Niyazi Meric

Ankara University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Physics

Supervisor: Prof. Dr. Nuray Būget

1990, Page:59

Jury: Prof. Dr. Nuray Būget

Prof.Dr.Cevdet Tezcan

Assoc. Prof. Dr. Tūlay Yeşin

In this study qualitative and quantitative analysis of four different samples of complex nature have been made by the *Neutron Activation Method*. In the experiments in which *Comparative Technique* has been employed for the quantitative analysis of elements, a sample of thorium britholite ore, (OKA-2) and samples with code numbers KTS-1, KTS-2, KTS-3, and KTS-4 taken from the Kızılcaören deposit in Eskişehir have been used as standard and unknowns respectively. The quantity of elements obtained by using gamma-ray spectrometers with Germanium detectors and computer programs have been compared with those found previously by other workers. The results have been found to be satisfactory except those of Iron and Europium.

KEY WORDS :Analysis of Gamma Spectra, Neutron Activation Analysis, Rare Earth Elements

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışması İstanbul Çekmece Nükleer Araştırma ve Eğitim Merkezi ve O.D.T.Ü. Kimya bölümü laboratuvarlarında gerçekleştirilmiştir. Katkıları ile çok değerli yardımlarını unutamayacağım sayın hocam Prof.Dr. Nuray Büğet'e teşekkürlerimi sunmayı ödenmesi gereken bir borç bilirim. Laboratuvar çalışmalarına imkân sağlayan sayın Prof. Dr. Atilla Özmen'e ve sayın Prof.Dr.Namık Aras'a, numuneleri hazırlama ve sayma aşamasında yakın ilgilerinden dolayı Arş.Gör. Mustafa Yatın'a , Arş.Gör Ali Acar'a, Dr.Nizamettin Erduran'a ve tüm İ.Ç.N.A.E.M personeline, tezimi bilgisayarda derleme aşamasında önerilerinden faydalandığım Arş.Gör.Orhan Çakır ve Arş.Gör.Bekir S. Kandemir'e teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
1. GİRİŞ	1
2. NÖTRON AKTİVASYON ANALİZİNİN TEMEL İLKELERİ	4
2.2.Nötron Reaksiyonları	6
2.3.Nötron Kaynakları	8
2.4.Nötron Aktivasyon Analizinde Kullanılan Genel Denklemler	9
2.5.Nötron Aktivasyon Analiz Tekniği	14
2.6.Aktivitelerin Ölçülmesi ve Gama Işını Spektrumunun Analizi	15
3. DENEY	17
3.1.Numunelerin Hazırlanması	18
3.2.Numunelerin Işınlanması	19
3.3.Sayma Sistemi	20
3.4.MikroSAMPO Programı	22
3.5.Sistemin Kalibrasyonu ve Aktivitelerin Ölçülmesi	22
3.6.Spektrumların Analizi ve Tartışma	36
4. SONUÇ	52
KAYNAKLAR	54
EK-A	56
EK-B	57

SİMGELER

NAA	Nötron Aktivasyon Analizi
N	Numunedeki Toplam Çekirdek Sayısı
ϕ	Nötron Akısı ($n.cm^{-2}.s^{-1}$)
σ	Reaksiyon Tesir Kesiti (cm^2)
N_t	t_i Işınlama Süresi Sonucu Oluşan Aktif Atomların sayısı.
A_t	t_i Işınlama Süresi Sonucunda Oluşan Aktivite
t_i	Işınlama Süresi
Y	Sayım Verimi
D	Dedektör Verimi
m	Elementin Ortalama Ağırlığı (g)
M	Elementin Atom Ağırlığı
f	Hedef Çekirdeğin Yüzde İzotropik Bolluğu
λ	Parçalanma Sabiti (s^{-1})
t_w	Soğuma Süresi (s)
t_c	Sayım Süresi (s)
E	Gama Enerjisi (Kev)
HPGe	Yüksek Saflıkta Germanyum Dedektörü
E.Y.	Elektron Yakalama
β^-	(-) Beta Yayınmı

I.GİRİŞ

Günümüzde, petrol, madencilik, jeoloji, tıp ve tarım gibi alanlarda başarı ile kullanılan madde analizi oldukça önem kazanmış, polisiye olaylarda bile kullanılmaya başlanmıştır. Bilinmeyen bir numunenin nitel ve nicel yönden analizi için değişik yöntemler vardır. X-ışını fluoresans tekniği,atomik soğurma (alev) spektrometresi, emisyon spektrometresi gibi yöntemler arasında en çok kullanılanlardan birisi *aktivasyon yöntemi* dir. Bu yöntem pahalı ve zaman alıcı olmasına karşın, madde miktarı az da olsa, çok hassas sonuçlar verdiğiinden diğerlerinden üstün tutulmaktadır. Ancak bu tekniğin kullanılabilmesi için reaksiyon sonucu oluşan maddenin radyoaktif olması ve aktifliğinin ölçülebilmesi gerekmektedir.Aktifliğin ölçülebilmesi de reaksiyon tesir kesitine, akıya ve ışınlanan madde miktarına bağlıdır.

Pratikte, genellikle, aktivasyon işlemi için yavaş nötronlar kullanılır. Bunun nedenlerinden biri girişim reaksiyonları sayısının azlığıdır. Ayrıca yöntem fazla karışık değildir ve tek ışınlama ile birçok elementin analizi yapılabilir. Yavaş nötron seçiminin en üstün yanı ise, yavaş nötron yakalama tesir kesitinin bir çok element için büyük olmasıdır. Reaktörlerdeki yüksek yavaş nötron akıları çok az miktardaki elementler için bile oldukça yüksek aktiviteler verir. Bu nedenle yavaş nötronlarla yapılan aktivasyon analizi eser halindeki elementlerin saptanmasında çok kullanılır. Ancak ,nötron kaynağı olarak bilinen reaktörlerin azlığı bu yöntemin kullanılmasını sınırlar. Reaktörlerin bulunmadığı yerlerde numuneler, akıları çok daha düşük olan radyoaktif nötron kaynakları ile ışınlanır. Bu durumlarda analizin uygulanması

ışınlanan madde miktarının ve ışınlama süresinin fazla ve reaksiyon tesir kesitinin büyük olması ile olasıdır. Radyoaktif nötron kaynaklarının tek üstün yanı ise girişim olaylarının, düşük akı nedeniyle, daha az görülmesidir.

Son yıllarda modern teknolojinin gelişmesine paralel olarak atom numaraları 57 ile 71 arasında bulunan *lantanit* grubu elementlerinin üretiminde, kullanım alanlarının genişlemesi nedeniyle hissedilir derecede artma görülmüştür.

Nadir toprak elementleri, metalurji'de jet motorlarıyla gaz türbünlerinin parçalarının yapımında; demir-çelik endüstrisinde kaliteli çelik ve dayanıklı boru hatları yapımında; petrokimya ve plastik sanayinde; cam ve seramik sanayinde parlatici ,optik camların yapımı , camların renklendirilmesi ve seramiklerin boyanmasında; elektronik sanayinde kuvvetli mıknatıs üretiminde, radyo alanında, civa lambalarında, renkli TV tüpü imalinde, bilgisayar üretiminde; nükleer reaktörlerde kontrol çubukları ve yakıt elemanlarının yapımında; sert ışınları geçirmeyen elbise ve levha yapımında kullanılır. Ülkemizde Eskişehir Sivrihisar-Kızılcaören yörelerinde bulunan bu elementler, tüm dünyada olduğu gibi bizim için de büyük önem taşımaktadır. Bu nedenle, bu çalışmada daha çok *Nadir toprak grubu* elementlerini içeren numuneler ele alınmış ve *Nötron Aktivasyon Yöntemi* ile madde miktarları saptanmıştır.

2.bölümde nötron reaksiyonları , nötron kaynakları, nötron aktivasyon analiz tekniği ve gama ışını spektrumları ile ilgili genel bilgiler verilerek gerekli

denklemler türetilmiş; 3.bölümde ise analizi yapılacak numunelerin hazırlanması, ışınlanması ve sayılması anlatılarak elde edilen gama ışını spektrumları ile bu spektrumlardan faydalanarak yapılan nitel ve nicel hesapların sonuçları verilmiş ve bulunan değerler diğer çalışmalarda elde edilenlerle karşılaştırılmıştır.

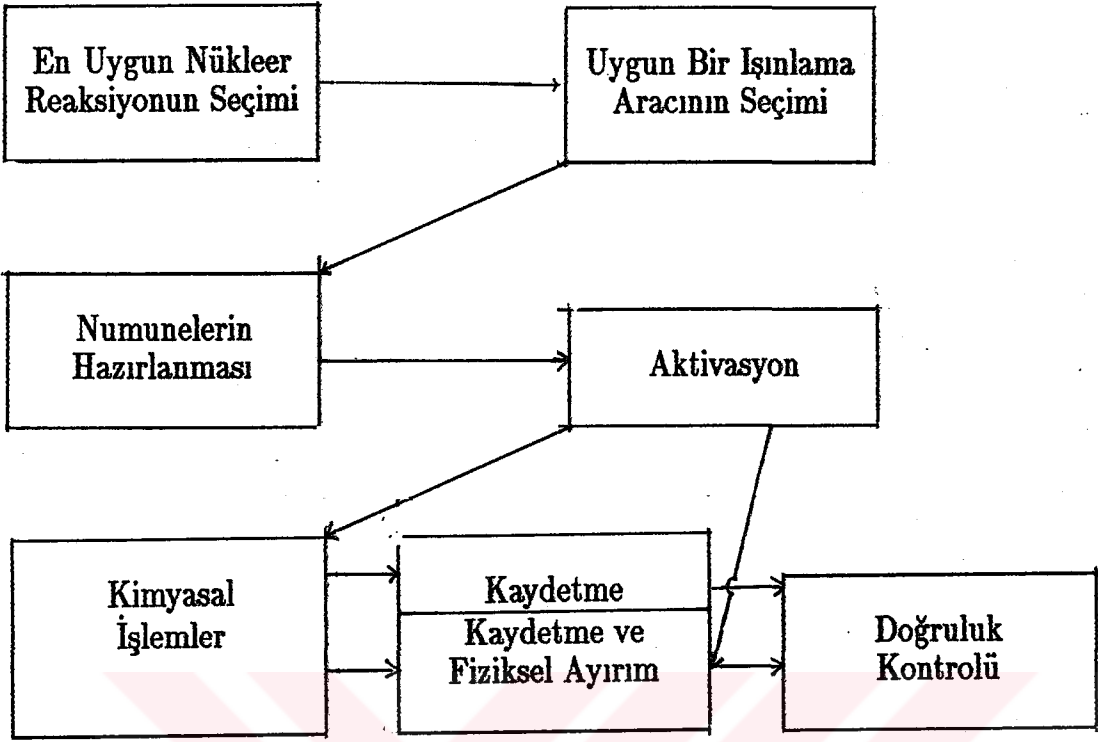


2.NÖTRON AKTİVASYON ANALİZİNİN TEMEL İLKELERİ

Aktivasyon analizi, bilinmeyen bir maddenin, nötron veya yüklü parçacıklarla ışınlanması sonucu oluşan radyoizotopları inceleyerek, nitel ve nicel yönden saptanmasıdır. Genellikle ışınlama sonucu oluşan izotoplar radyoaktiftir ve belli yarı ömürlerle alfa , beta veya gama ışınları yayarak bozunurlar. Bu izotopların saflığı enerji ve yarı ömür tayinleri ile kontrol edilebilir. Duyarlılık, ışınlama süresine, ışınlayan parçacıkların sayısına, reaksiyon tesir kesitine , reaksiyona giren izotopun bolluğuna , ölçülen aktivitenin yarı ömrüne ve ölçülerin verimine bağlıdır. Tesir kesitleri de parçacık enerjisi ve reaksiyon türü ile değiştiğinden uygun reaksiyonlar seçerek bir numune içindeki saptanacak elementleri aktiflemek , diğerlerinin aktiflenmesini ise kısmen veya tamamen önlemek mümkündür, (Lenihan vd,1972).

Nötron aktivasyon analizinde genellikle iki yöntem uygulanır. Bunlardan birincisi elementin fiziksel ve kimyasal özelliklerine dayanır. Işınlama sonucunda oluşan elementin kimyasal ayrımı yapılır ve aktivite ölçümleri ile miktarı saptanır. Numunenin bozunmadan incelendiği ve yalnızca fiziki özelliklere dayanan ikinci yöntemde ise kimyasal ayırma gerek yoktur, (Milaslov, 1970).Şekil:2.1 aktivasyon analizinde izlenen basamakları şematik olarak göstermektedir.

Nötron aktivasyon analizinde madde miktarını saptamak için daha çok oluşan aktivitenin gama spektrumları kullanılır. Ölçü işlemleri (i) nitel ve (ii) nicel olmak üzere iki basamakta gerçekleştirilir. Nitel çözümlene ile numune içinde .



Şekil 2.1 Aktivasyon analizinin genel planı.

ışınlama sonucu oluşan elementler, yarı ömürleri ve yaydıkları ışınların enerjileri yardımıyla saptanır. Kimyasal ayırım yapıldığı durumlarda (gama) enerji spektrumları karışık olabilir. NAA inde ölçülerin güvenilir olması için bazı noktalara dikkat etmek gerekir. Birden fazla kararlı izotopu olan elementler birçok aktif izotopun oluşumuna neden olabilir. Hedef maddede birden fazla elementin olduğu durumlarda ise, kimyasal ayırım yapılmadıkça girişim olayları gözlenebilir. Işınlama zamanının ayarlanması ile istenmeyen bazı aktivitelerden kurtulmak mümkündür. Bu reaksiyon tesir kesitine ve oluşan aktivitenin yarı ömrüne de bağlıdır. Ayrıca, uygun bir sayma tekniği ile karakteristik radyasyonların enerjisi ve bozunma biçimi açığa çıkarılabilir. Bilinen yarı ömür de bu bilgilere eklendiğinde radyoizotopun belirlenmesi sağlanır.

Nicel çözümlemede ise *Mutlak Yöntem* ve *Kıyaslama Yöntemi* olmak üzere izlenen iki yol vardır. Bunlardan ilkinde reaksiyon tesir kesitini ve akıyı bilmek zorunludur. İkincisinde ise bilinmeyen numune, standart bir numune ile kıyaslanır. Kıyaslamada aynı ışınlama ve sayma koşulları kullanılır. Miktar tayini için fotopiklerin altındaki alanlardan yararlanır(Koch,1960). Bu alanları hesaplamak için bazı yöntemler geliştirilmiştir. *Covell's yöntemi* (Covell, 1959) ve *yarı pik alan yöntemi* [Celenk,1986] bunlar arasındadır. Bu yöntemler genellikle doyurucu sonuçlar verdiği halde piklerin üstüste bindiği durumlarda başarısızdır. Bu nedenle 1960 yılındanberi pik ayrımları için GAMANAL (Gunnik,v.d., 1972) , HYPERMET (Phillips, v.d., 1976) , GAUSS 7 (Helmer,R.G. 1986) , SAMPO (Aarnio, v.d. 1988) gibi bilgisayar programları geliştirilmiştir.

2.2. Nötron Reaksiyonları

Nötronların yükleri olmadığından, atomun elektronları ile etkileşmeleri çok zayıftır. Bunun yanında yüklü parçacıklara kıyasla avantajları Coulomb bariyeriyle karşılaşmamaları nedeniyle çekirdeklere rahatça ulaşabilmeleridir.

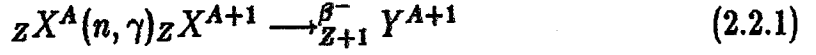
Nötronların neden olduğu çeşitli reaksiyonlar vardır.Belli bir reaksiyonun başlayabilmesi büyük ölçüde nötron enerjisine ve hedef çekirdeğin kütle numarasına bağlıdır. Nötronun madde ile etkileşmesi saçılma ve yutulma olmak üzere iki ana gruba, saçılma reaksiyonları da esnek ve esnek olmayan saçılma olmak üzere iki alt gruba ayrılır.Esnek saçılmada nötron ve hedef çekirdeğin çarpışmadan önceki

ve sonraki kinetik enerjileri toplamı eşittir. Esnek olmayan saçılma durumunda ise gelen nötronun kinetik enerjisinin bir kısmı hedef çekirdeği uyarmak için harcanır. Uyarılmış çekirdek daha sonra gama geçişi ile normal hale döner. Nötron ve protonlar arasında yalnızca esnek çarpışmalar söz konusudur. Oysa, çekirdeklerle hem esnek hem de esnek olmayan çarpışmalar mümkündür. Enerjinin düşük (0.1-10Mev) ve 10Mev den büyük olma durumlarında ise sırasıyla esnek ve esnek olmayan çarpışmalar hakimdir.

Soğurma reaksiyonları ise, nötronun hedef çekirdekle etkileşmesi sonucu, gama ışını, nötron ve yüklü parçacıkların salındığı, (n, γ) , (n, p) , (n, α) , $(n, 2n)$ v.s. gibi reaksiyonlardır. Bu reaksiyonların *aktivasyon tesir kesiti* diye adlandırılan olma olasılığı daha önce de belirtildiği gibi hedef çekirdeğin kütle numarasına ve büyük ölçüde nötron enerjisine bağlıdır. Düşük nötron enerjilerinde ara çekirdeğin uyarılma enerjisi parçacık çıkması için yeterli değildir. Bu durumda, uyarılmış çekirdek gama ışını çıkararak normal hale döner. Bu nedenle, genel olarak düşük enerjilerde ve kısmen ağır çekirdeklere (n, γ) reaksiyonları hakimdir. Nötron enerjisi arttıkça nötron, proton, alfa v.s gibi parçacıkların çıkma olasılığı da artar. Yüksek nötron enerjilerinde ise *fisyon* ve *çok parçacık salınma* olayları gözlenir (Kaplan, 1963).

Nötron soğurma olayları arasında en önemlilerinden birisi (n, γ) reaksiyonlarıdır. Bu reaksiyonlarda ilgili elementin, kütle numarası bir fazla olan diğer bir izotopu elde edilir. Ürün çekirdek kararlı veya kararsız olabilir. Genellikle kararsız çekirdekler, nötron fazlalığı nedeniyle elektron çıkartarak bozunurlar. Bir ${}_Z X^A$

çekirdeğinin nötronlarla ışınlanması sonucu oluşan reaksiyon



ile gösterilebilir. β^- bozunumu ile birlikte, eğer Y çekirdeği uyarılmış bir durumda bırakılmış ise, gama ışınları da gözlenir. Bu (gecikmiş) gama ışınları ile (n, γ) reaksiyonundan çıkan (ani) gama ışınlarını karıştırmamak gerekir. Genelde, nötron aktivasyon analizleri, gecikmiş gama ışınlarının enerji ölçümleri ile gerçekleştirilir, (Aras,1987). Eğer element, kütle numaraları birbirini izleyen kararlı izotoplara sahip ise o zaman hafif izotoplar tarafından nötron yakalanması radyoaktivite ölçümü için uygun olmayan kararlı izotopların oluşmasına yol açar. Bu durumda, gözlenecek aktivite, en ağır kararlı izotopun ışınlanmasıyla oluşan aktivitedir.

2.3. Nötron Kaynakları

Nükleer reaktörler en fazla nötron üreten kaynaklardır. Akıların $10^{12} - 10^{14} n.cm^{-2}.s^{-1}$ civarında bulunduğu bu reaktörlerde yakıt olarak genellikle, yavaş nötronlar için fisyon tesir kesitleri büyük olan, doğal U^{235} ile yapay yolla üretilen U^{233} ve Pu^{239} kullanılmaktadır. Nötron enerjisi ise, fisyon spektrumundaki en büyük değer ile ısı bölge arasında değişen bir dağılım göstermektedir. Bu nedenle, reaktörlerde ısı nötron elde etmek için *moderatör* denilen yavaşlatıcı ortamlardan yararlanır.

Hızlandırılan yüklü parçacıkların bir hedef üzerine düşürülmesi prensibi-ne dayanan nötron jeneratörlerinin en iyi yanı, tek enerjili nötronlar üretmesidir. (α, n) , $(\alpha, 2n)$, (p, n) gibi reaksiyonlar sonucu oluşan nötronların enerjisi, gelen parçacık

enerjisine ve hedef çekirdek kütesine bağlıdır. Gelen parçacık enerjisi arttıkça, istenilen enerjide nötron elde etmek için kullanılması gereken hedef çekirdeğin bulunduğu bölge de genişler. Örneğin (α, n) reaksiyonları için ~ 20 Mev alfa enerjisinde uygun hedef seçimi çok kolaylaşır. Çünkü bu durumda tüm periyodik çizelge kullanılabilir. Ancak (α, n) reaksiyonları, tesir kesitleri düşük olduğundan, yüksek akılara gereksinim gösterirler.

Günümüzde, özellikle az gelişmiş ülkelerde, döteryum veya trityum hedeflerden yararlanarak sırasıyla ~ 2.5 ve ~ 14 Mev enerjili nötronlar üreten ve akısı $10^8 - 10^9 n.cm^{-2}.s^{-1}$ civarında olan (p, n) reaksiyonuna dayalı jeneratörler çok kullanılmaktadır. Radyoaktif nötron kaynakları ise hedef madde ile doğal radyoaktif bir kaynağın karışımından oluşmaktadır. Radyoaktif kaynaktan salınan radyasyonların hedefi ışınlaması sonucu oluşan nötronların akısı izotropiktir ve $10^4 - 10^7 n.cm^{-2}.s^{-1}$ arasında değişir. En uygun radyoaktif nötron kaynakları (α, n) kaynaklarıdır. En çok kullanılan *Hedef-radyoaktif madde* karışımları ise *Polonyum-Berilyum, Radyum-Berilyum, Plutonyum-Berilyum ve Amarisiyum-Berilyum* dur (Aras, 1987).

2.4. Nötron Aktivasyon Analizinde Kullanılan Genel Denklemler

Bir hedef ışınladığında, her parçacık bir çekirdek reaksiyonu oluşturmaz. Gelen parçacık ile hedef çekirdeğin etkileşerek bir çekirdek reaksiyonu yapma olasılığına, o reaksiyon için *tesir kesiti* (σ) adı verilir. Tesir kesitinin birimi yüzey birimi olduğundan,

her hedef çekirdek üzerinde σ gibi belli bir bölge bulunduğu, reaksiyonun, gelen parçacık yalnızca o bölgeye çarptığı zaman olacağı düşünülebilir. Tesir kesiti, tepkimenin türüne ve gelen parçacığın enerjisine bağlıdır.

Belirli bir numune, bir parçacık demetiyle ışınladığında birim zamanda oluşan nükleer reaksiyonların sayısı(veya reaksiyon hızı)

$$R.S = \phi\sigma N \quad (2.4.1)$$

ile verilir. ϕ , birim zamanda birim yüzeye gelen parçacık sayısı yani akı , σ reaksiyon tesir kesiti, N ise numunedeki toplam çekirdek sayısıdır.

Reaksiyon sonucu oluşan ürün çekirdeklerin radyoaktif olma ve λ sabiti ile bozunması durumunda bu bağıntı

$$\frac{dN_t}{dt} = \phi\sigma N - \lambda N_t \quad (2.4.2)$$

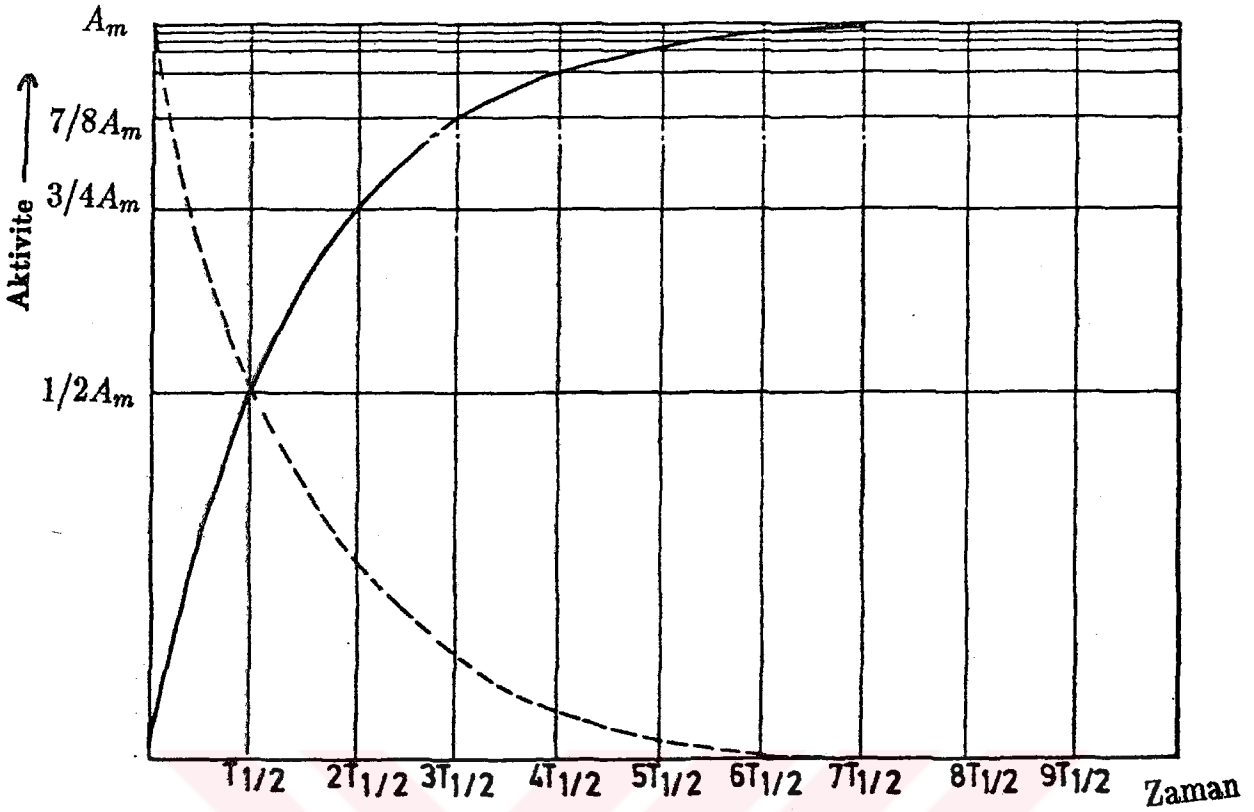
şeklini alır. Burada ilk ve ikinci terimler sırasıyla çekirdeklerin çoğalma ve azalma oranlarını gösterir. Bu denklemin ($t=0$ anında $N_t = 0$ başlangıç koşulu ile) çözümü bize

$$N_t = \frac{\phi\sigma N}{\lambda}(1 - e^{-\lambda t_i}) \quad (2.4.3)$$

ve

$$A_t = \lambda N_t = \phi\sigma N(1 - e^{-\lambda t_i}) \quad (2.4.4)$$

bağıntılarını verir. Bu bağıntılarda N_t ve A_t sırasıyla t_i ışınlama süresi sonucu oluşan aktif atomların sayısı ve aktivitesidir. Şekil 2.2 aktivitenin ışınlama süresince



Şekil 2.2. T yarı ömrüyle aktiviteğin (a)ışınlama boyunca artması (b) bozunması artmasını ve ışınlama bitiminden sonra azalmasını göstermektedir. Bu çizim bize bir numunenin ne süre ışınlanması gerektiği hakkında bilgi sağlar. Görülüyor ki ışınlama süresi ne kadar uzun olursa olsun A_t nin alacağı maksimum değer $A_m = \phi \sigma N$ dir. Oysa süresi bir yarı - ömre eşit bir ışınlama ile maksimum aktivitenin yüzde ellisini, iki yarı -ömre eşit olanla ise yüzde yetmiş beşini elde etmek mümkündür. Bu durumda, pratik olarak maksimum aktivite için en uygun ışınlama süresi 5-6 yarı ömür kadardır (Arya, 1966).

İşinlenen numune içersinde, birbirinden farklı yarı-ömürlere sahip çekirdeklerin ışınlama sonundaki aktiflikleri de doğal olarak birbirlerinden farklıdır. Numune de bulunan uzun yarı ömürlü bir çekirdeği gözleyebilmek için belirlediğimiz t ışınlama süresi, kısa yarı-ömre sahip bir başka çekirdeğin gereğinden fazla aktiflenmesine neden olabilir. Bu da teknik olarak dedektörde sayma güçlüğü doğurabilir. Bundan

başka, numuneyi, ışınlamanın hemen ardından saymak mümkün olmayabilir. İşte, ışınlamanın bitiminden saymanın başladığı ana kadar geçen süreye *soğuma süresi* adı verilir. t ile gösterilen bu süre sonundaki aktiflik

$$A = A_t e^{-\lambda t} \quad (2.4.5)$$

formülünden bulunabilir. Diğer taraftan aktivite miktarının elde edilmesinde parçalanma ve sayım oranları arasındaki ilişkiyi belirleyen Y sayım veriminin göz önünde bulundurulması gerekir. Bu ilişki

$$A = \frac{D}{Y} \quad (2.4.6)$$

şeklinindedir. Burada A aktiviteyi, D dedektör sayımını gösterir. Sayım verimi ise bir takım faktörlerin çarpımından oluşur ve değeri sıfır ile bir arasında değişir:

$$Y = f_G \cdot f_A \cdot f_S \cdot f_T \cdot f_E \cdot f_I \cdot f_D \quad (2.4.7)$$

Burada f_G geometri faktörünü, f_A (dedektör ile kaynak arasındaki boşlukta) soğurma faktörünü, f_S saçılma faktörünü, f_T dedektör sisteminin *cözülme zamanı* faktörünü, f_E dedektör verimini, f_I gama ışını yayılma olasılığını ve f_D diğer dedektör parametrelerini gösterir, (Gardner, 1967). Bu durumda ışınlamanın bitiminden t_w kadar zaman sonra, t_c süre sayan bir dedektörden, herhangi bir çekirdek için alınacak sayım

$$D = Y A_t \int_{t_w}^{t_w+t_c} e^{-\lambda t} dt \quad (2.4.8)$$

veya

$$D = Y \phi \sigma N (1 - e^{-\lambda t_i}) \int_{t_w}^{t_w+t_c} e^{-\lambda t} dt \quad (2.4.9)$$

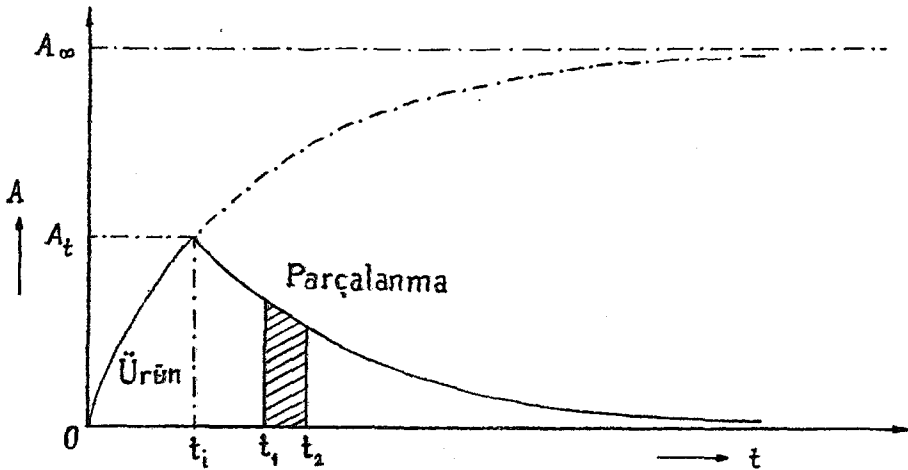
denkleminde bulunabilir. Bu denklemin integrali alınıp $N = \frac{6.02 \cdot 10^{23} \cdot m \cdot f}{M}$ konulduğunda en genel çözüm

$$D = \frac{Y \phi \sigma 6.02 \times 10^{23} m f}{M \lambda} (1 - e^{-\lambda t_i}) e^{-\lambda t_w} (1 - e^{-\lambda t_c}) \quad (2.4.10)$$

şeklinde elde edilmiş olur. Burada, Y sayım verimi, ϕ nötron akısı ($ncm^{-2}s^{-1}$), σ reaksiyon tesir kesiti, m elementin ortalama ağırlığı, M elementin atom ağırlığı, f hedef çekirdeğin yüzde izotropik bolluğu, λ parçalanma sabiti, t_i ışınlama süresi, t_w soğuma süresi, t_c sayım süresidir.(şekil 2.3)

Nötron aktivasyon analizinde sonuçların güvenilir olması, ışınlama sonucu oluşan aktivite miktarına çok bağlıdır.2.4.10 bağıntısında görüldüğü gibi sonucu etkileyen en önemli faktörlerden biri reaksiyon tesir kesitidir. Bunun için de uygun bir reaksiyon seçimi gerekmektedir. Ayrıca, hedef çekirdeğin doğada bulunma oranı ve ışınlama süresi de göz önünde bulundurulması gereken noktalardır.

Pratikte ışınlama süresini iki veya üç yarı ömürden fazla tutmak, hassaslığı artırmak açısından önemli bir yarar sağlamaz. Bu nedenle uzun yarı ömürlü radyoaktif çekirdek veren reaksiyonların aktivasyon analizinde kullanılması pek uygun olmaz. Böyle durumlarda aktivasyon süresi uzayacağından analiz pahalıya mal olur(Milaslow,1970).



Şekil 2.3 Ürün çekirdeğin oluşumu ve bozunması. Burada $t_w = t_1 - t_i$ ve $t_c = t_2 - t_1$

2.5 Nötron Aktivasyon Analiz Tekniği

Nötron aktivasyon analizinde kullanılan iki ışınlama ve analitik deney tekniği vardır: Bunlar *mutlak teknik* ve *kıyaslama tekniği* olarak adlandırılır (Koch, 1960).

Mutlak deney tekniğinde (2.4.10) deklemine göre, m madde miktarının saptanması için, diğer büyüklüklerin yanında ϕ akısının da kesin olarak bilinmesi veya ölçülmesi gerekir. Bu nedenle, bu yöntem oldukça zor, zaman alıcı ve yapılan hatalar diğer tekniğe kıyasla daha büyük olduğundan, ancak standart numunenin bulunmadığı durumlarda kullanılır.

Kıyaslama deney tekniğinde ise numunenin kıyaslanacağı bir standart numuneye gereksinim vardır. Numune ve standart aynı anda ve aynı koşullar altında ışınlanır ve sayılır. Böylece (2.4.10) denklemindeki tüm parametrelerin doğru olarak bilinmesi zorunluluğu ortadan kalkar. (2.4.10) denklemi numune ve standart için ayrı ayrı yazılıp taraf tarafa oranlandığında;

$$D_x = \frac{Y\phi\sigma_x 6.02 \times 10^{23} f m_x}{M\lambda} (1 - e^{-\lambda t_i}) e^{-\lambda t_w} (1 - e^{-\lambda t_c}) \quad (2.5.1)$$

$$D_s = \frac{Y\phi\sigma_s 6.02 \times 10^{23} f m_s}{M\lambda} (1 - e^{-\lambda t_i}) e^{-\lambda t_w} (1 - e^{-\lambda t_c}) \quad (2.5.2)$$

ve

$$\frac{D_x}{D_s} = \frac{m_x}{m_s} e^{\lambda(t_{w_s} - t_{w_x})} \quad (2.5.3)$$

veya

$$m_x = m_s \frac{D_x}{D_s} e^{-\lambda(t_{w_s} - t_{w_x})} \quad (2.5.4)$$

gibi basit bir denklem elde edilir. Burada λ bozunma sabiti, m_x , m_s ve D_x , D_s aynı elementin numune ve standarttaki miktarları ve bunlara karşı gelen sayımlar, t_{w_x} ve t_{w_s} ise soğuma zamanlarıdır.

2.6 Aktivitelerin Ölçülmesi ve Gama Işını Spektrumunun Analizi

Aktivasyon analizi günümüzde yaygın bir biçimde kullanılan *gama spektroskopisi* ne dayalı bir yöntemdir. Gama spektrumu elde edilmesinde sodyum iyodür (NaI), germanyum- lityum (Ge-Li) ve saf germanyum (Ge) gibi kristaller kullanılır. Gama ışınlarının bu kristallerle etkileşmesi başlıca üç yolla olur: Fotoelektrik soğurma, Compton saçılması ve çift oluşum olayı. Bu olayların olma olasılıkları gelen ışının enerjisine ve maddenin atom numarasına bağlıdır.

Fotoelektrik olayda gama ışını atoma bağlı bir elektronla etkileşir ve enerjisinin hemen hemen tümü elektron tarafından soğurulur. Elektronun bağlanma enerjisi ise X-ışını olarak ortaya çıkar. X-ışınlarının elektronla birlikte kristalde durdurulmaları halinde, gamanın tüm enerjisi kristalde soğurulduğundan, elde edilen elektriksel puls yükseklikleri gelen gama enerjisi ile orantılı olur. Böylece spek-

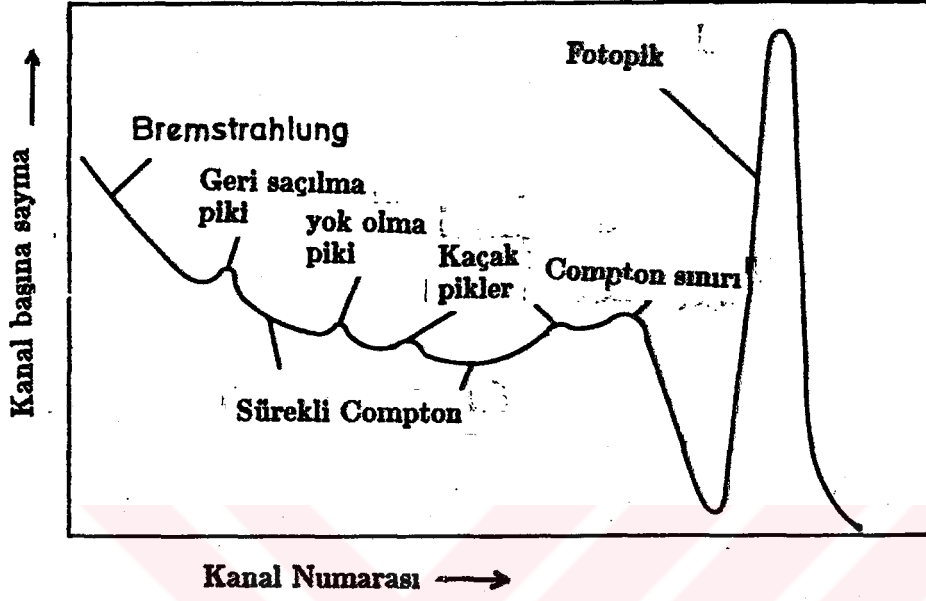
trumda, enerji ölçümü için uygun bir *fotopik* gözlenir. X- ışınlarının kristalden kaçması halinde ise spektrumda kaçak pikler oluşur.

Compton olayında gelen gama ışını serbest bir elektronla etkileşerek enerjisinin bir kısmını ona verir,kendisi de daha düşük bir enerji ile saçılır.Compton elektron enerjisinin açığa bağlılığı nedeniyle puls yükseklikleri bir dağılım gösterir. Bu dağılım üzerinde, X-ışını kaçak pikleri dışında, bazı durumlarda saçılan gamaların kristal çevresinde bulunan maddelerden 180° açı altında geriye dönmeleri ve kristalde yeniden durdurulmaları sonucu oluşan *geri saçılma piki* gözlenir.

Çift oluşum olayı ise, gelen gama enerjisinin 1.02 Mev den büyük olduğu durumlarda önem kazanır.Gama ışınının genelde ağır bir çekirdek yanında yok olmasıyla oluşan elektron kısa sürede kristalda durdurulur. Pozitron ise durmasına yakın,bir elektronla birleşerek, zıt yönlere giden herbiri 0.51 Mev enerjili iki foton oluşturur. Bu fotonlardan biri veya her ikisi de kristalden kaçabilir. Bu durumda spektrumda enerjileri sırasıyla $E_\gamma - m_0c^2$ ve $E_\gamma - 2m_0c^2$ olan *yok olma pikleri* gözlenir,(Singru,1972).

Pratikte, gama spektrumunda yukarıda belirtilen olaylar dışında *Bremsstrahlung*, *yok olma* gibi olayların da etkileri gözlenir. Eğer çekirdek γ ışını ile beraber elektron da salyorsa spektrum, düşük enerji bölgesinde *Bremsstrahlung* radyasyonlarının etkisi altındadır.Pozitron salınma durumlarında ise 0.51 Mev enerjide bir *yok olma piki* vardır,(Quither,1972). Şekil 2.4 bir gama spektrumunda gözlenebilecek pikleri

göstermektedir.



Şekil 2.4 Tek Enerjili Gama Işını Spektrumu.

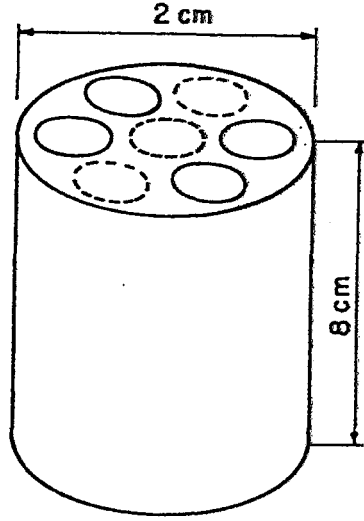
3. DENEY

Bu çalışmada, *Nötron aktivasyon analizi* ile yapılan madde miktarı tayinleri için, ışınlamalar ve ön saymalar İstanbul Çekmece Nükleer Araştırma ve Eğitim Merkez'inde, daha sonraki saymalar ise Orta Doğu Teknik Üniversitesi Kimya Bölümü (Nükleer Kimya) laboratuvarlarında gerçekleştirildi. *Kıyaslama Tekniğ*in den yararlanılan çalışmada standart olarak Ankara Nükleer Araştırma ve Eğitim Merkezi'nden sağlanan OKA-2 kodlu Toryum Britolit cevheri, numune olarak da Eskişehir-Kızılcaören bölgesinden alınan KTS-1, KTS-2, KTS-3 ve KTS-4 kod numaralı dört ayrı toprak numune kullanıldı .

3.1 Numunelerin Hazırlanması

Numunelerin ışınlanmasında kullanılan tüpler, iç ve dış yüzeylerinin yabancı maddelerden arınması için, üç gün süreyle nitrik asitli suya yatırıldı . Bundan sonra tüpler on dakika kadar bırakılıp, damıtık suyla iyice yıkandıktan sonra etüvde iki gün süreyle, 60° de kurutuldu.

Tüplerin içine standart ve numunelerden ayrı ayrı , belli miktarlarda (100 mg kadar) madde konuldu. Bir tüp de boş bırakıldı . Böylece hazırlanan altı (dört numune, bir standart ve bir boş) tüp, ağızları kapatıldıktan sonra, reaktörde su altı ışınlaması yapabilmek için, silindirik şekilde saf aliminyumdan yapılmış iç çapı 2 cm olan ışınlama tüpünün içine yerleştirildi (şekil 3.1). Ağız su geçirmeyecek



Şekil 3.1 Işınlama tüpü

şekilde presle kapatılan tüp daha sonra vakum testinden geçirilerek ışınlamaya hazır hale getirildi.

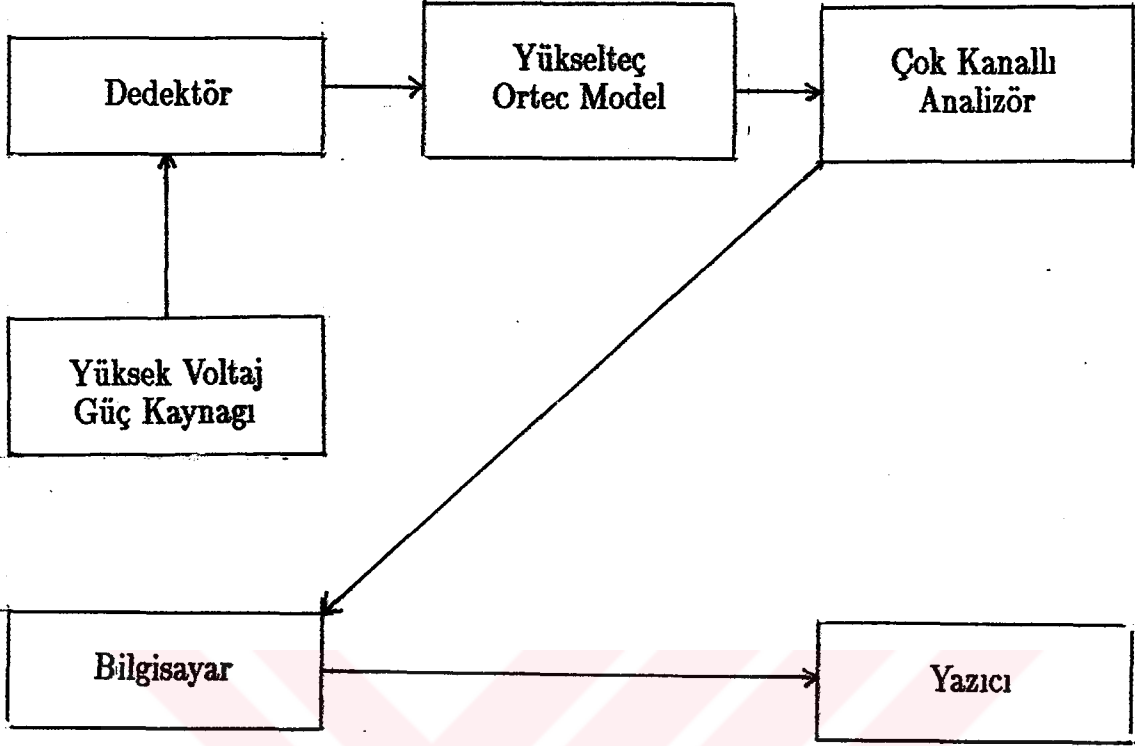
3.2 Numunelerin Işınlanması

Işınlamaların gerçekleştirildiği 5MW gücündeki havuz tipi TR-2 araştırma reaktöründe yakıt olarak zenginleştirilmiş uranyum-235, yavaşlatıcı ve soğutucu olarak da hafif su kullanılmaktadır. Bu su aynı zamanda, havuzun 6.90 m derinliğinde bulunan reaktör kalbi üzerindeki yüksekliği nedeniyle radyasyon zırlaması görevini de görür.

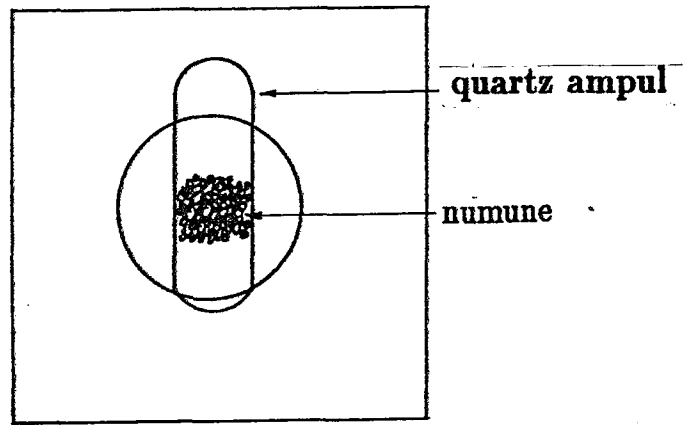
İşılancak numuneler, işılama askıları yardımıyla, kalp çevresinde bulunan alüminyumdan yapılmış su kutularının içine indirildi. 30 dakika süreyle $3.88 \times 10^{13} n.cm^{-2}.s^{-1}$ lık bir termik nötron akısıyla işılancan numuneler, radyasyon doz miktarının kabul edilebilir seviyeye düşmesi için 24 saat bekletildikten sonra havuzdan alındı ve üç gün daha soğumaya bırakıldı . Bu süre sonunda alüminyum düzenekten çıkarılan tüplerin dış yüzeyleri yeniden temizlendi ve numuneler saymaya hazır hale getirildi.

3.3 Sayma Sistemi

Aktiviteler önce Çekmece Nükleer Araştırma ve Eğitim Merkezi (ÇNAEM) Fizik Bölümü Labaratuarlarında $83 cm^3$ lük bir Ge-Li dedektörü ile ölçüldü. Puls- lar ortec tipi bir yükselteçten geçtikten sonra 4096 kanallı Canberra-2020 tipi analizöre gönderildi. Piklerin enerji ve alanları , kalibrasyonun $Mn^{54}, Co^{57}, Co^{60}, Ba^{133}$ ve Cs^{137} gibi nokta kaynaklarla yapıldığı analizörün çıkışından alındı . Orta Doğu Teknik Üniversitesi (ODTÜ) Kimya Bölümü Labaratuarlarında gerçekleştirilen diğer saymalarda ise, $85 Cm^3$ lük aktif hacmi olan ve gücünü bir ortec kaynağından sağlayan yüksek safılıkta bir germanyum (HPGe) dedektörü kullanıldı . Puls- lar bir ortec yükselteci aracılığıyla 4096 kanallı (Canberra 35 artı model) analizöre gönderildi. Buradan elde edilen spektrum IBM-XT tipi bir mikro bilgisayara aktarılarak, mikroSampo programı yardımıyla analiz edildi. Şekil 3.2 sayma sistemlerini şematik olarak göstermektedir.



Şekil 3.2 Sayma sistemi.



Şekil 3.3 Saymada kullanılan karton

Aktiviterin aynı geometrik koşullarda sayılabilmesi için, quartz tüpler tek tek şekil 3.3 de görüldüğü gibi, ortası oyulmuş, standart büyüklükte kartonlara yerleştirildi. Çevreden gelen aktiviteri en aza indirebilmek için de dedektör kristalinin etrafı kurşun bloklarla örüldü.

3.4 MicroSAMPO Programı

MikroSampo gama spektrumu analizinde kullanılan bilgisayar programlarından biridir, (Aarnio, vd, 1988). Bu program yardımıyla enerji ve verim kalibrasyonu, pik ayarlama işlemleri yapılabilir ve pik alanları ve bunlar üzerindeki hatalar hesaplanabilir. Pik biçimlerinin kalibrasyonu, programın ana işlemlerinden biridir. Bu işlemdeki amaç üst üste binen piklerin ayrılması, pik alanlarının ve doğal fonun duyarlı bir şekilde saptanması ve hataların minimuma indirilmesidir. Program, merkezde bir gauss eğrisi ve kuyruklarda bu eğriyle düzgün olarak birleşen üstel fonksiyonlar kullanır.

3.5 Sistemin Kalibrasyonu ve Aktiviterin Ölçülmesi

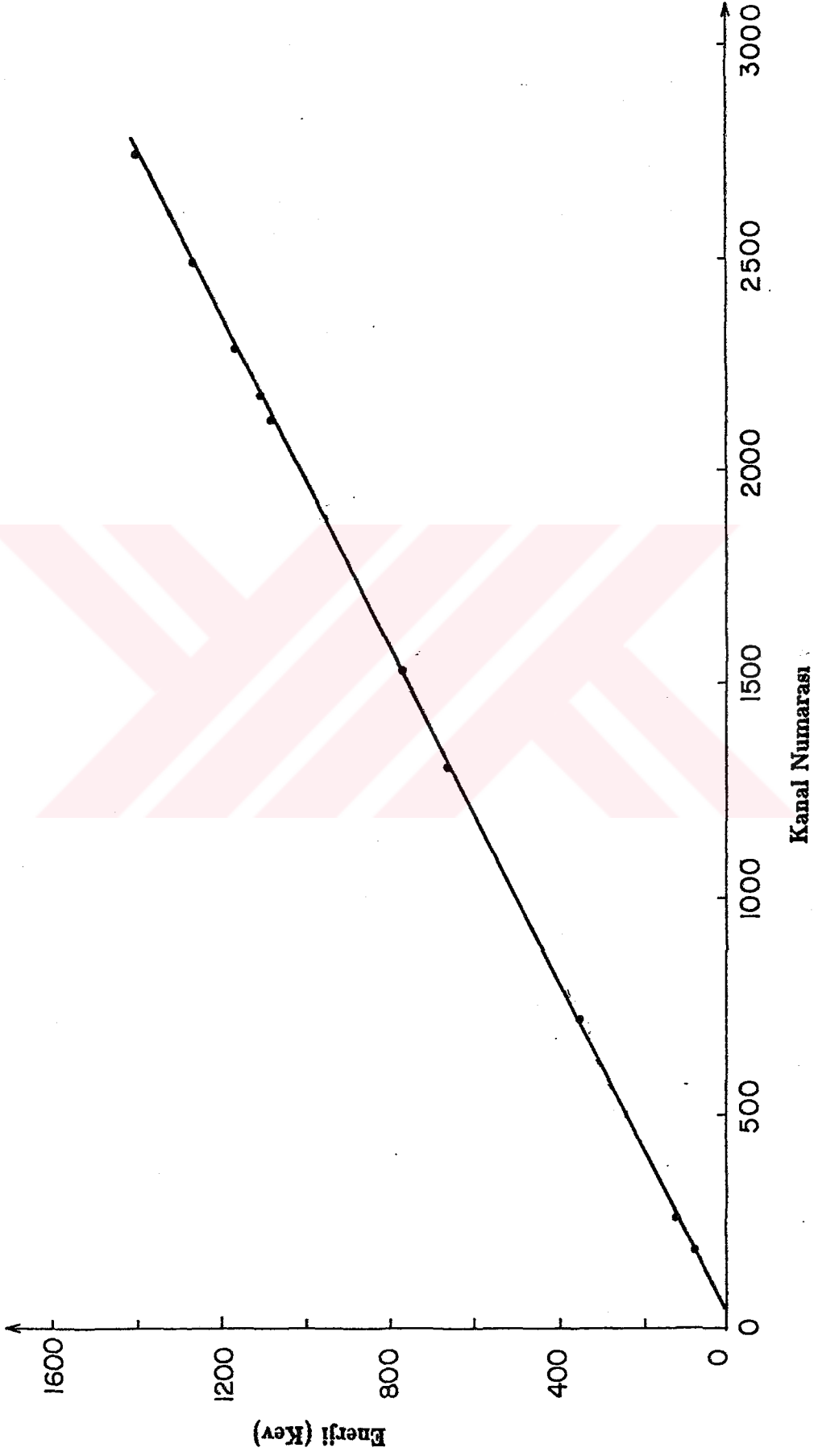
Enerji kalibrasyonu için tablo 3.1 deki nokta kaynaklardan yararlanıldı. Veriler bilgisayara yüklendi ve Gauss ayarlaması ile şekil 3.4 de görülen lineer kalib-

rasyon eğrisi elde edildi.

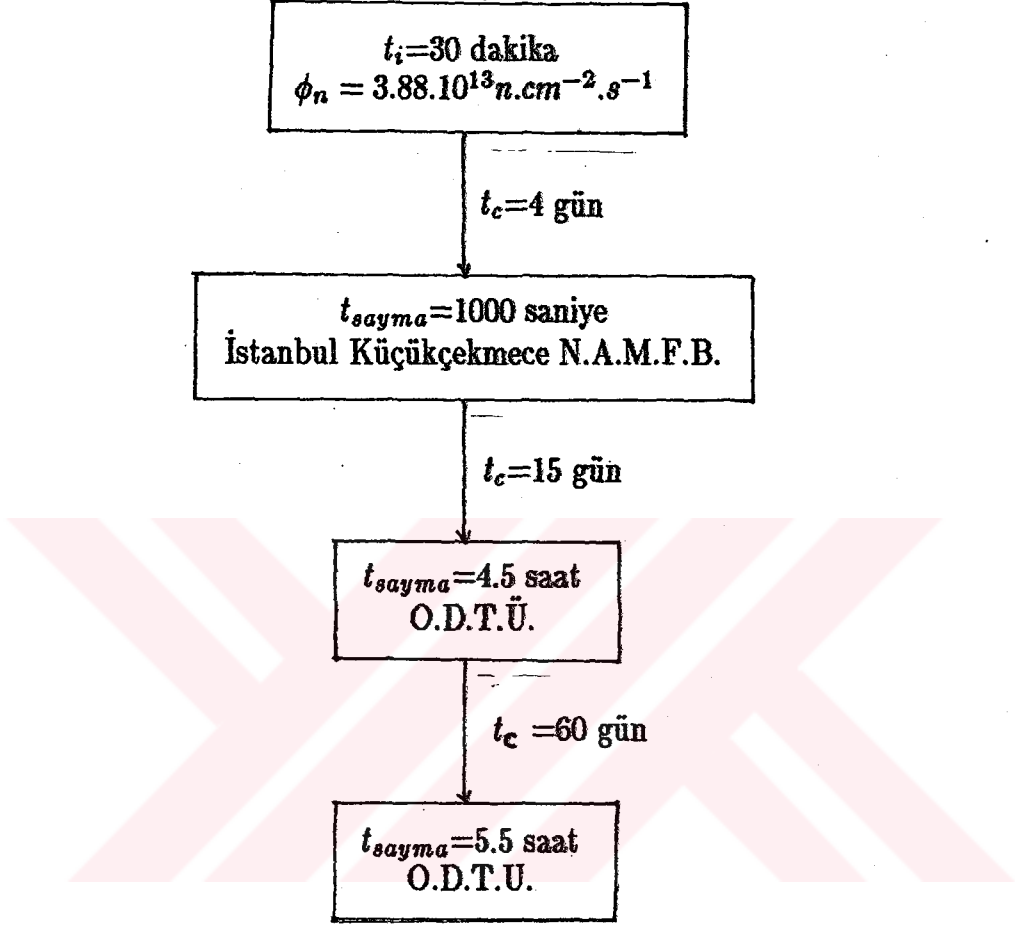
Tüm numuneler, standart ve boş quartz tüp ışınlamadan dört gün sonra bin saniye, onbeş gün sonra dört buçuk saat, altmış gün sonra da beş buçuk saat olmak üzere üçer kez sayıldı (şekil 3.5). Saymalarda, numunelerin dedektörden uzaklığı sistemin ölü zamanı %10 sınırını aşmayacak şekilde ayarlandı .ÇNAEM laboratuvarında alınan ön saymalarda ise yüksek aktiviteler nedeniyle ölü zaman oldukça yüksekti (~ %80). Şekil 3.6 ve 3.7 KTS-1 ve standart numune için elde edilen enerji spektrumlarını göstermektedir.

Çizelge 3.1 Enerji kalibrasyonunda kullanılan nokta kaynaklar.

Kalibrasyon kaynağı	Fotopik enerjisi (Kev)	Kanal numarası
Co^{60}	1173.2	2249
	1332.5	2549
Cs^{137}	661.6	1282
	1112.07	2134
Na^{22}	1274.5	2440
Eu^{152}	121.78	265
	244.67	497
	344.30	684
	778.90	1505
	1408.00	2692



Şekil 3.4 Linear Kalibrasyon Eğrisi



şekil 3.5 Işınlama ve sayma şeması .

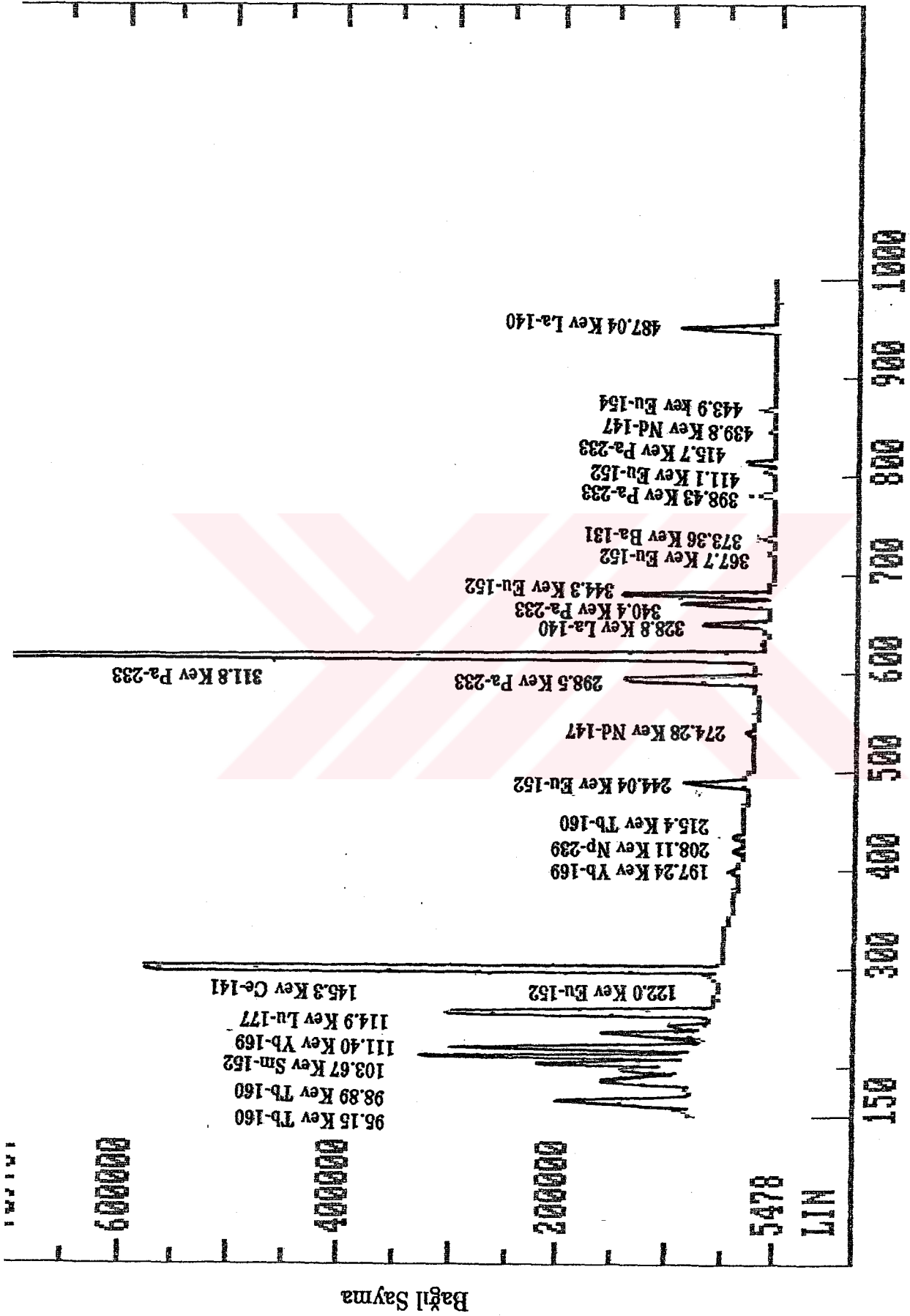
Şekil 3.6 OKA-2 standartının reaktörde ışımlandıktan 15 gün sonraki gama ışını spektrumu.

a)150-1000 kanalları arasındaki gama ışını spektrumu.

b)1000-2000 kanalları arasındaki gama ışını spektrumu.

c)2000-3000 kanalları arasındaki gama ışını spektrumu.

d)3000-4000 kanalları arasındaki gama ışını spektrumu.



Kanal numarası

Bağlı Sayma

5478

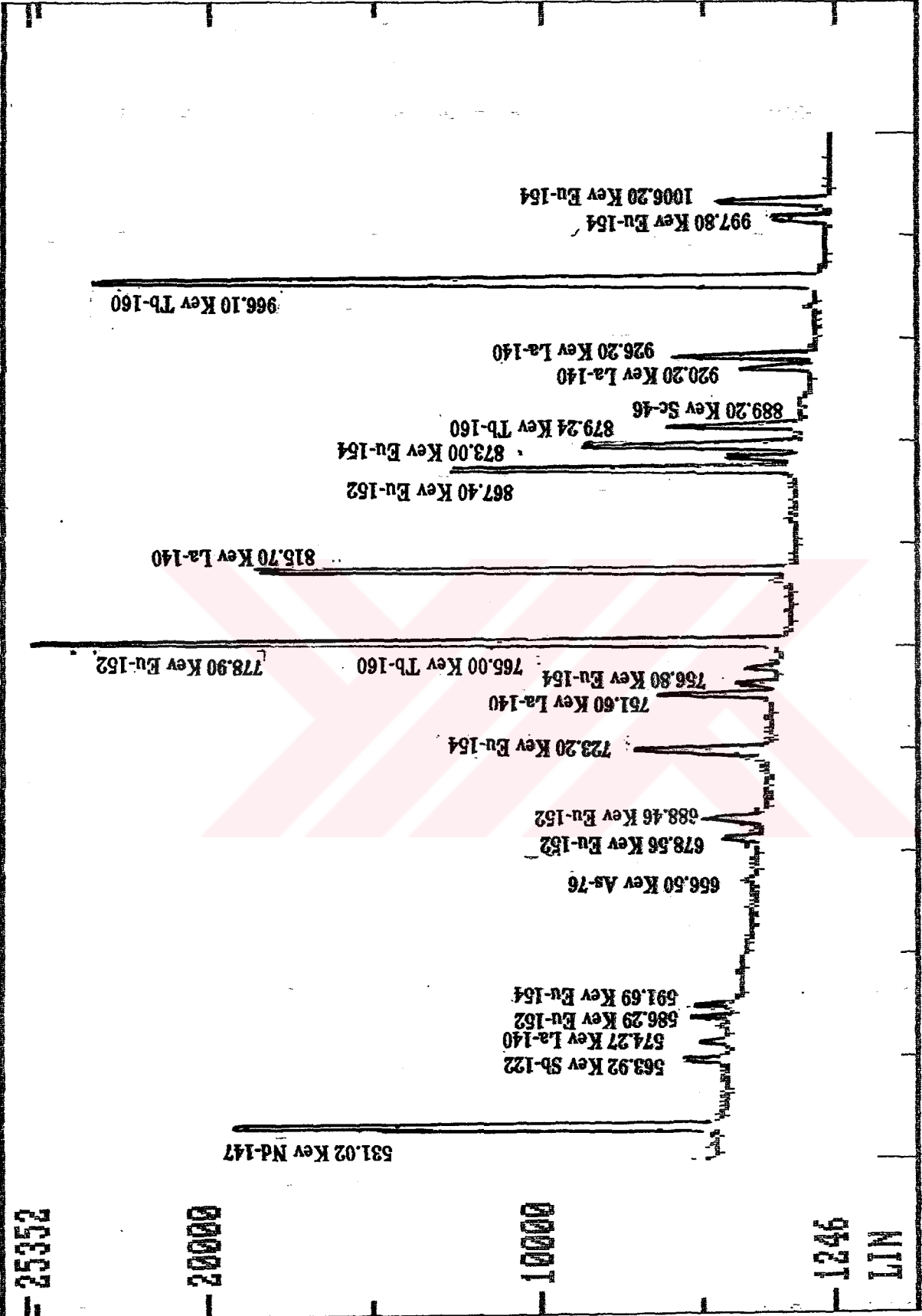
400000

200000

100000

5478

LIN



2000

1500

1000

Kanal Numarasi

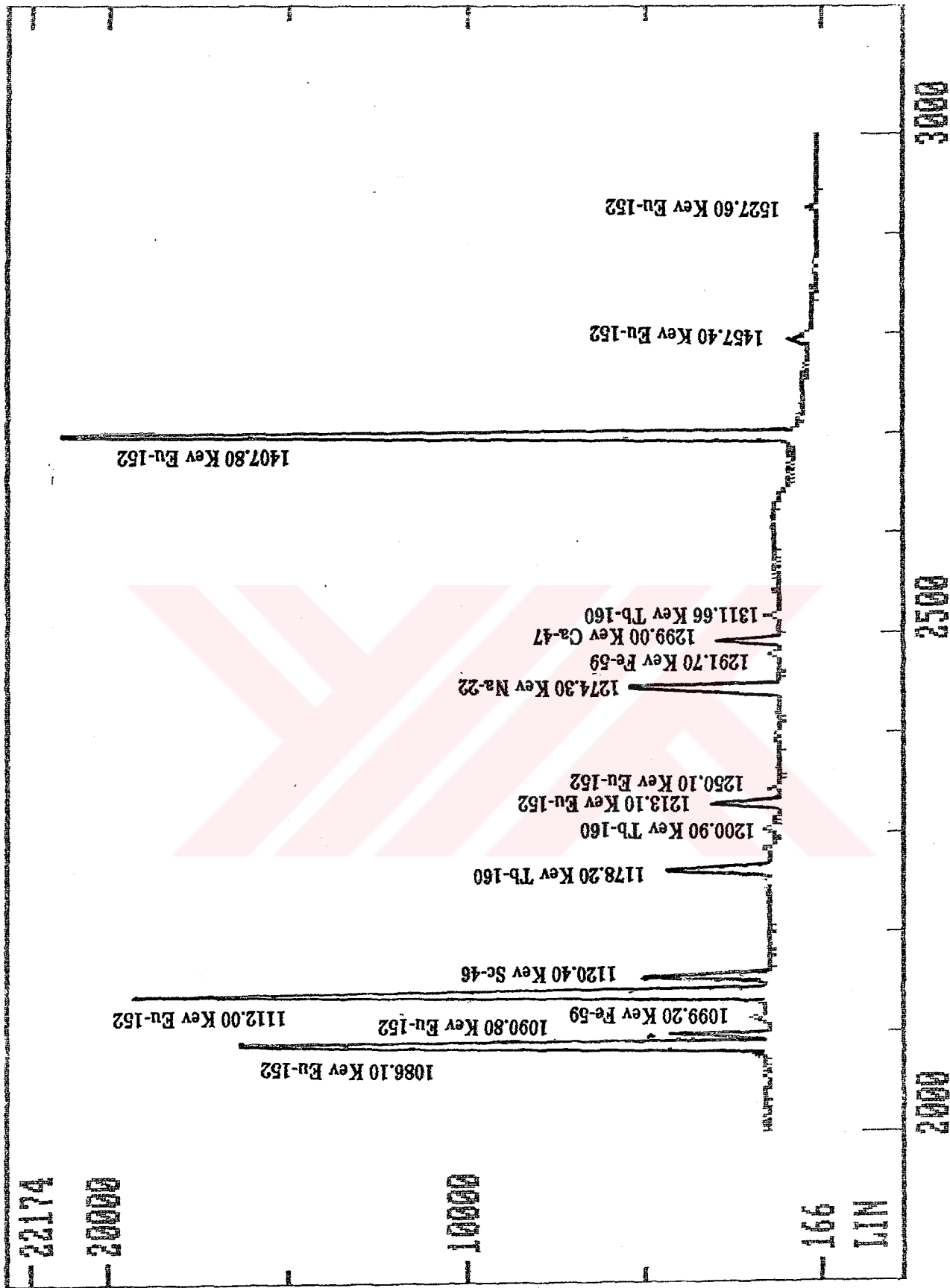
Bağlı Sayma

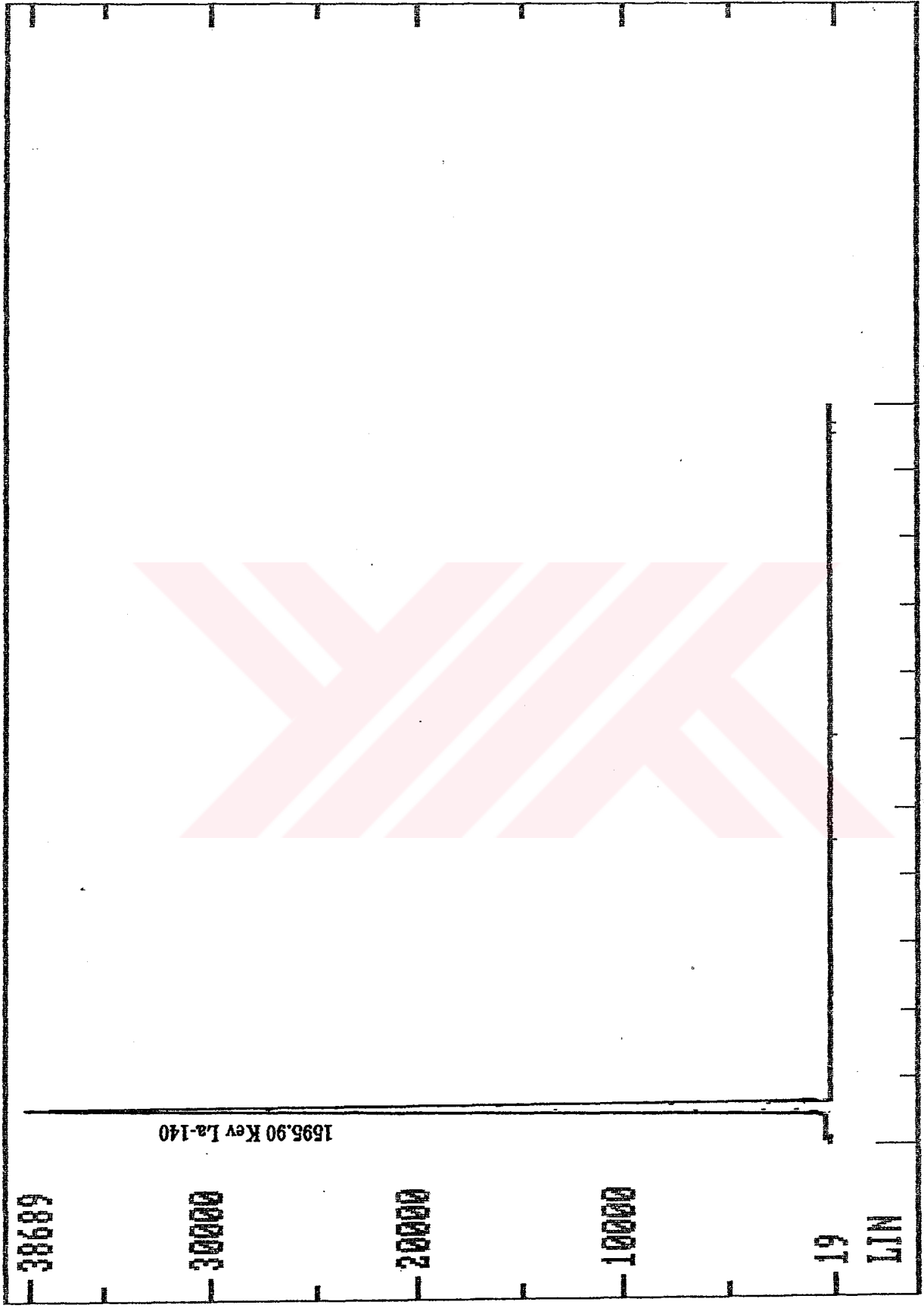
9521
NIT

10000

20000

25352





Bağlı Sayma

4096

3500

3000

Kanal Numarası

19
LIN

1595.90 Kev Ia-140

68989

30000

20000

10000

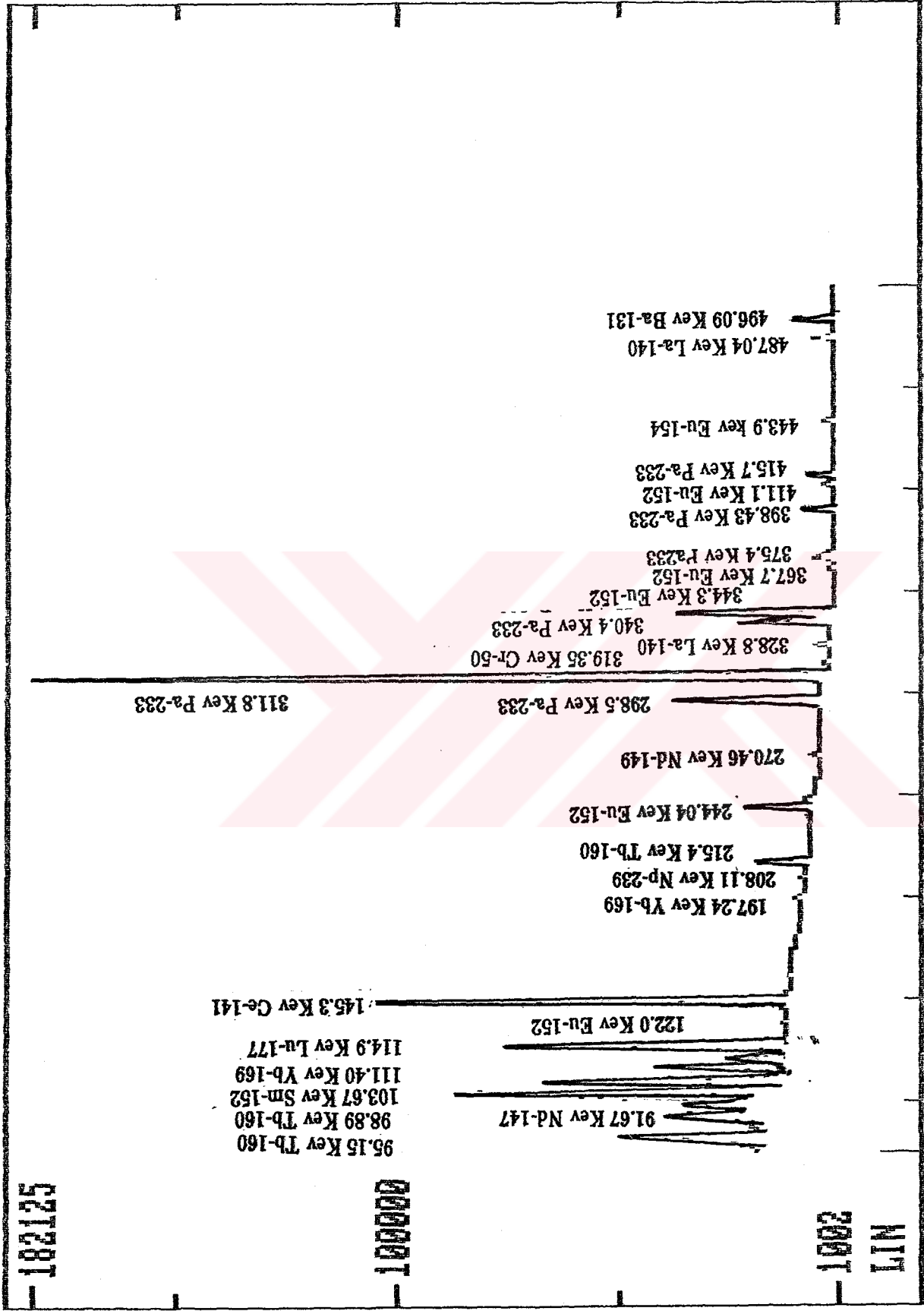
Şekil 3.7 KTS-1 numunesinin reaktörde ışınılandıktan 16 gün sonraki, gama ışını spektrumu.

a)150-1000 kanalları arasındaki gama ışını spektrumu.

b)1000-2000 kanalları arasındaki gama ışını spektrumu.

c)2000-3000 kanalları arasındaki gama ışını spektrumu.

d)3000-4000 kanalları arasındaki gama ışını spektrumu.



521381

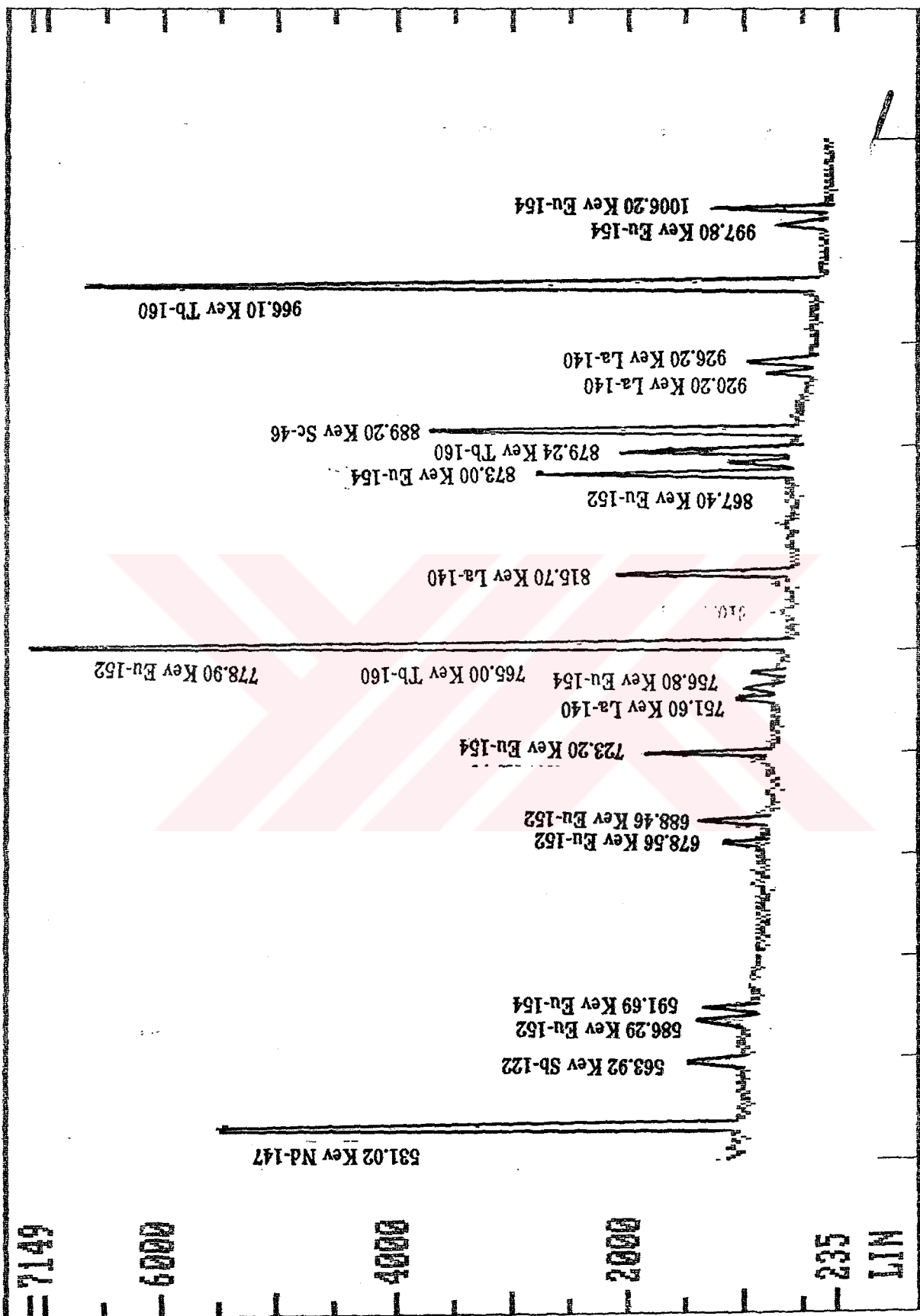
10000

2000

NIT

150 300 400 500 600 700 800 900 1000

Kanal Numarası



Kanal Numarasi

2000

1500

1000

NT

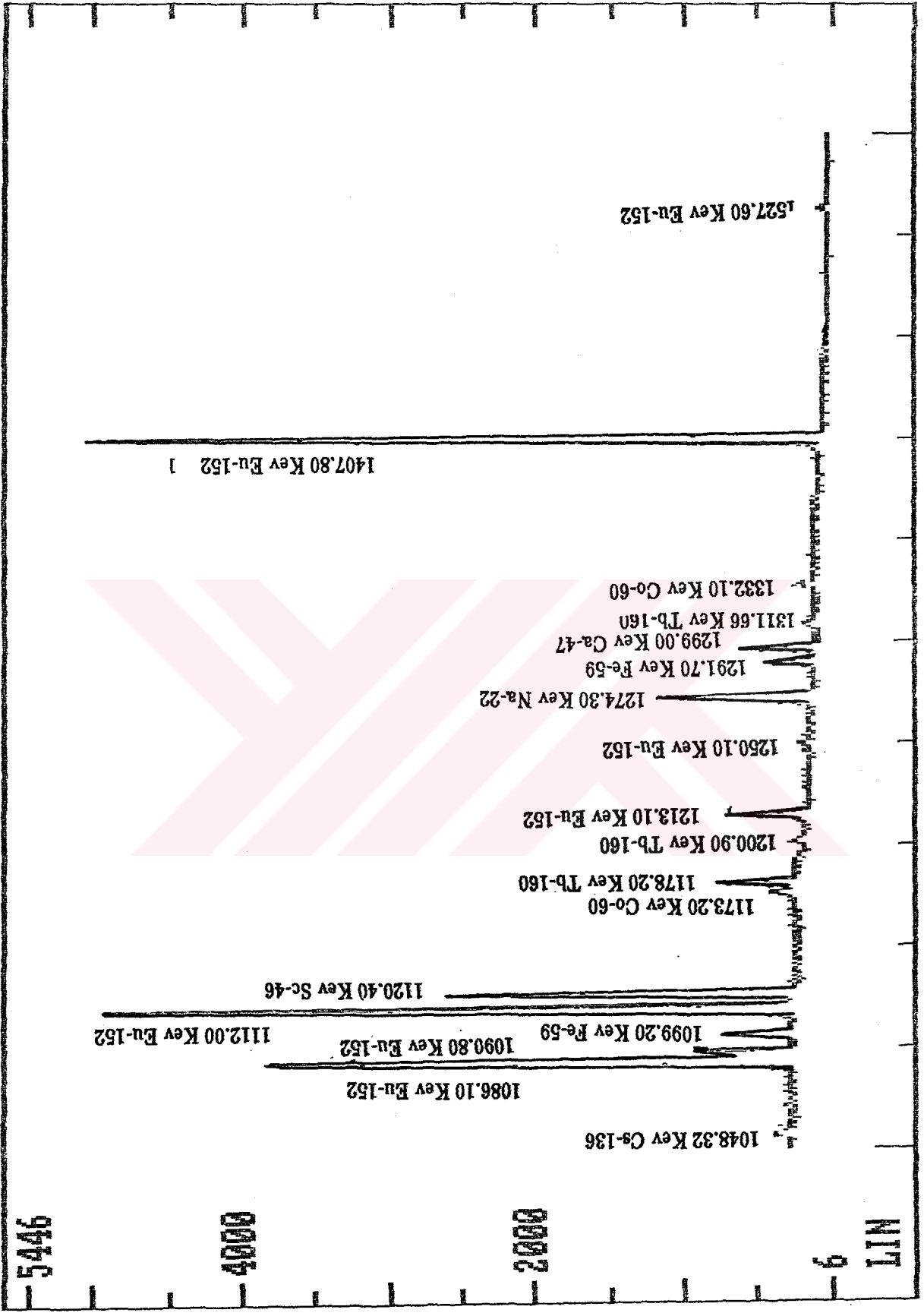
235

400

600

7149

Bağlı Sayma



3000

2500

2000

Kanal Numarası

NIT

Bağlı sayma

5446

4000

2000



Bağlı Sayma

1595.90 Kev La-140

2647

2000

1000

0

3000

3500

4000

Kanal Numarası

M17

3.6 Spektrumların Analizi Ve Tartışma

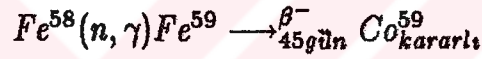
Şekil 3.6 ve şekil 3.7 de görüldüğü gibi, 2000 kev enerjiye kadar elde edilen ve 100 kev in altında kalan bölgesi, karmaşıklığı nedeniyle, göz önüne alınmayan spektrumların analizi iki basamakta gerçekleştirildi.

1- Nitel Analiz: Bu çözümlemede, enerjileri bilgisayar yardımıyla belirlenen piklerin hangi elementlere ait olduğu saptandı . Saptama işleminde izotopların bozunum şemaları ve çıkardıkları gama ışınlarının enerjileri göz önüne alındı . Kısa ömürleri nedeniyle her sayımda gözlenemeyen ve girişime uğrayan pikler dışında, bozunum eğrileri çizildi.

2- Nicel Analiz : Elementlerin sayısal analizinde, bilgisayarla elde edilen pik alanlarından yararlanıldı . Hesaplarda kullanılacak reaksiyonun seçimi için, hedef çekirdeğin bolluğu, ürün çekirdeğin yarı ömrü ve çıkardığı gama ışınlarının şiddeti,reaksiyon tesir kesiti ve girişim enerjileri gibi faktörler göz önüne alındı (Ek-B). Aynı elementten gelen çeşitli gamalar arasında bazıları , aktiflikleri girişimler nedeniyle düzensizlik gösterdiğinden, elendi. Böyle durumlarda analiz en uygun gama enerjisi belirlenerek gerçekleştirildi. Fotopiklerin seçimi, aşağıda belirtildiği gibi yapıldı ve madde miktarları bölüm 2.5 de bahsedilen kıyaslama yöntemiyle ve 2.5.4 denklemini kullanılarak saptandı .

Demir (Z-26)

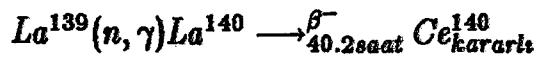
Demir elementinin doğada Fe^{54} , Fe^{56} , Fe^{57} ve Fe^{58} olmak üzere dört kararlı izotopu vardır. Fe^{56} ve Fe^{57} den elde edilen ürün çekirdekler kararlı olduğundan yalnızca Fe^{54} ve Fe^{58} in aktif izotopunu üretmek mümkündür. Ancak Fe^{54} den oluşan aktif ürün çekirdek γ ışını çıkarmadığından hesaplar



reaksiyonu ile oluşan Fe^{59} ürün çekirdeğinin yalnızca ikinci ve üçüncü sayımlarda gözlenebilen 1099.2(%100) ve 1291.5(%77) Kev'deki fotopikleri yardımıyla yapıldı .

Lantan(Z-57)

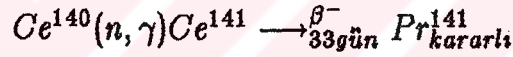
Lanthan elementinin La^{138} ve La^{139} olmak üzere iki kararlı izotopu vardır. La^{138} 'in, doğada bulunma oranı çok düşük ve La^{139} ürün çekirdeğinin kararlı olması nedeniyle kullanılması olanaksız olduğundan, bu element için madde tayini, doğada bulunma oranı yüksek olan La^{139} çekirdeğinin verdiği



reaksiyonu ile yapıldı . Hesaplar ise bollukları en fazla olan 1591.1(%97) ve 487.0(%46) Kev'deki piklerle gerçekleştirildi.

Seryum (Z-58)

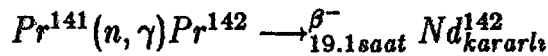
Seryum'un doğada Ce^{136} , Ce^{138} , Ce^{140} ve Ce^{142} olmak üzere dört kararlı izotopu vardır. Bunlardan Ce^{136} ve Ce^{138} in doğada bulunma oranları diğerlerine göre çok küçüktür. Ce^{142} den oluşan Ce^{143} aktif izotopundan gelen gamaların ise Er^{171} , Tb^{160} ve Eu^{154} un , enerjileri sırasıyla 296(%28), 299(%30) ve 724(%21) Kev olan gamaları ile girişim yapma olasılığı bulunduğundan, hesaplarda %88.44 oranında bulunan Ce^{140} izotopunun verdiği



reaksiyonu göz önüne alındı ve madde miktarı Ce^{141} ürün çekirdeğinin 145.4(%49.3) Kev enerjili gama piki ile yapıldı .

Praseodmiyum (Z-59)

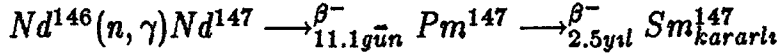
Bir kararlı izotopu olan praseodmiyum un saptanması



reaksiyonu sonucu oluşan Pr^{142} aktif izotopunun 1575.5(%30) Kev deki piki ile gerçekleştirildi.

Neodmiyum (Z-60)

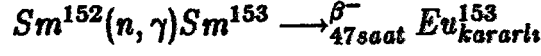
Bu elementin Nd^{142} , Nd^{143} , Nd^{144} , Nd^{145} , Nd^{146} , Nd^{148} ve Nd^{150} olmak üzere yedi kararlı izotopu vardır. Isıl nötron reaksiyonları Nd^{142} , Nd^{143} , Nd^{144} ve Nd^{145} ile kararlı çekirdekler verdiğinden, Nd^{148} ve Nd^{150} den üretilen aktif izotoplar da kısa ömürlü olduğundan madde tayininde



reaksiyonundan yararlanıldı . Hesaplar için Ce^{141} ürün çekirdeğinin 531(%13) Kev enerji piki seçildi. 91.4(%27) kev deki pik X-ışını bölgesinde kalması , 319.4(%20) Kev deki ise, Lu^{177m} den gelen aynı enerjili gamalarla girişim yapma olasılığı bulunması nedeniyle kullanılmadı .

Samaryum (Z-62)

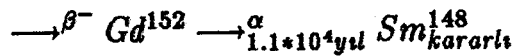
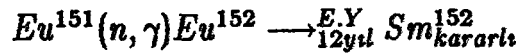
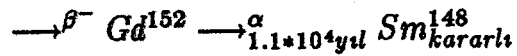
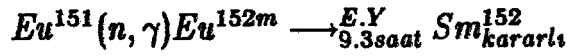
Samaryum un Sm^{144} , Sm^{147} , Sm^{148} , Sm^{149} , Sm^{150} , Sm^{152} ve Sm^{154} olmak üzere yedi kararlı izotopu vardır. Bunlardan Sm^{147} , Sm^{148} ve Sm^{149} ısıl nötronlarla reaksiyona girdiklerinde aktif ürün izotop vermezler. Sm^{144} ve Sm^{150} nin doğada bulunma oranları ise diğerlerine göre düşük ve verdikleri ürün çekirdeklerin yarı ömürleri uzundur. Ayrıca Sm^{154} den oluşan ürün çekirdeğin yarı ömrü de çok kısa olduğundan analizde %26.72 bulunma oranına sahip Sm^{152} nin verdiği



reaksiyonu kullanıldı ve hesaplar Sm^{153} izotopunun 103.2(%27) Kev fotopiki ile yapıldı . Ancak, aynı enerjide yarı ömrü 242 gün olan Gd^{153} aktif izotopunun da bir piki bulunduğundan analiz, ilk sayımlardan elde edilen pik alanlarından, üçüncü sayımda elde edilen pik alanı düşülerek yapıldı .

Europyum (Z-63)

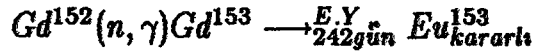
Europyum un doğada Eu^{151} ve Eu^{153} olmak üzere iki kararlı izotopu vardır. Eu^{153} den oluşan aktif ürün çekirdeğin yarı ömrü çok uzun (16 yıl), reaksiyon tesir kesiti de diğerine göre küçük olduğundan spektrumda yalnızca aşağıdaki reaksiyon gözlemlendi:



Uzun ömürlü Eu^{152} izotopunun gama piklerinde kısa ömürlü çekirdek aktivitelerinin girişimlerinden olduğu sanılan bazı düzensizlikler saptandı . Gamaları, Er^{171} , Pm^{151} ve Tb^{160} izotoplarından gelen ve enerjileri sırasıyla 124(%9), 340(%21) ve 966(%31) Kev olan piklerle girişim yapan Eu^{152m} aktivitesi ise yalnızca birinci saymada görüldü. 70 gün yarı ömürlü Tb^{160} aktivitesinin, ikinci ve üçüncü saymalarda gözlenmemesi nedeniyle, oluşmadığı varsayıldı ve hesaplar Eu^{152m} nin 963.1(%12) Kev piki kullanılarak yalnızca, ölü zamanın çok büyük olduğu, ilk sayma ile yapıldı .

Gadolinium (Z-64)

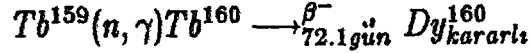
Gadolinium un Gd^{152} , Gd^{154} , Gd^{155} , Gd^{156} , Gd^{157} , Gd^{158} ve Gd^{160} olmak üzere yedi tane kararlı izotopu vardır. Gd^{154} , Gd^{155} , Gd^{156} ve Gd^{157} izotopları , ısı nötronlarla reaksiyon sonucu kararlı izotop verirler. Gd^{158} ve Gd^{160} in ısı nötron reaksiyon tesir kesitleri ise Gd^{152} ye göre çok küçüktür. Bu nedenle spektrumda yalnızca



reaksiyonundan oluşan Gd^{153} aktivitesi gözlemlendi. 103.1(%39) Kev deki fotopiki daha önce bahsedildiği gibi aynı enerjideki 47 saat yarı ömürlü Sm^{153} ' ün fotopikiyle karışabileceğinden hesaplar, Sm^{153} aktivitesinin bittiği varsayımıyla üçüncü sayımdaki değerler üzerinden yapıldı. 97.4(%52) Kev enerjili pik, X-ışınları bölgesinde bulunduğu için kullanılmadı .

Terbiyum (Z-65)

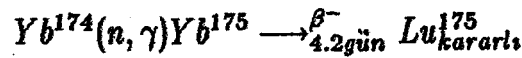
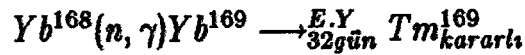
Terbiyum un saptanması doğada bolluğu %100 olan Tb^{159} izotopu ile gerçekleştirildi.



reaksiyonu sonucu oluşan Tb^{160} aktif izotopunun gama enerjileri, Tm^{170} , Eu^{154} ve Eu^{152} den gelen sırasıyla 84(%3.3), 876(%12) ve 965(%15) Kev enerjileri ile girişim yaptığından hesaplarda yalnızca 1178.0(%17) Kev'deki pik kullanıldı .

İterbiyum (Z-70)

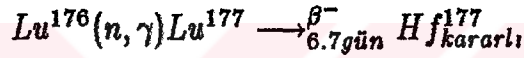
İterbiyum un doğada Yb^{168} , Yb^{170} , Yb^{171} , Yb^{172} , Yb^{173} , Yb^{174} ve Yb^{176} olmak üzere yedi tane kararlı izotopu vardır. Yb^{170} , Yb^{171} , Yb^{172} ve Yb^{173} 'ün verdiği ürün çekirdekler kararlıdır. Yb^{176} 'dan üreyen ürün çekirdeğin yarı ömrü ise çok kısadır. Diğer reaksiyonlar



şeklindedir. Yb^{169} aktif izotopunun gama enerjileri Lu^{177} 'den gelen 113.0(%2.8) Kev, Lu^{177m} 'den gelen 113.0(%28), 128.0(%17), 174.0(%13) Kev ve Tb^{160} 'dan gelen 197(%6)Kev gama enerjileri ile; Yb^{175} in gamaları ise Lu^{177} ve Lu^{177m} in sırası ile 113(%23) ve 281(%14) Kev deki enerjileri ile girişim yaptığından hesaplar Yb^{169} un ve Yb^{175} in sırasıyla 109.7(%18), 282.5(%37) Kev fotopikleri kullanılarak yapıldı.

Lutesyum (Z-71)

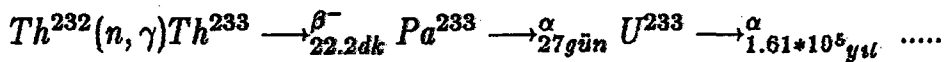
Lutesyum un doğada Lu^{175} ve Lu^{176} olmak üzere iki kararlı izotopu vardır. Lu^{175} in bulunma oranı %97.41 olmasına karşın nötron tesir kesitinin ve aktif izotopunun yarı ömrü küçük olduğundan analizde



reaksiyonu kullanıldı . Lu^{177} ve Yb^{175} in 114 Kev'deki gamaları girişim yaptığından hesaplarda 208.3(%8) Kev enerji pikinden yararlanıldı .

Toryum (Z-90)

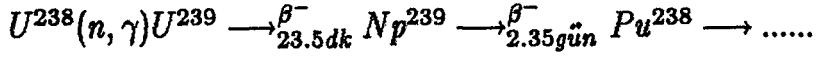
Bu elementin saptanması , doğada %100 bollukta bulunan Th^{232} izotopu aracılığıyla gerçekleştirildi



Reaksiyonunun verdiği Th^{233} 'ün yarı ömrü çok kısa olduğundan analizlerde Pa^{233} ün 311.8(%100) ve 340.4(%12) Kev'deki pikleri kullanıldı .

Uranyum (Z-92)

Doğada %99.27 oranında bulunan U^{238} izotopu ısı nötronlarla reaksiyona girdiğinde oluşan U^{239} aktif izotopu aşağıda görüldüğü gibi çok kısa sürede Np^{239} aktif izotopuna dönüşmektedir:



Bu nedenle numunelerdeki uranyum miktarı Np^{239} aktif izotopunun 208.3(%28) Kev'deki pikinden hesaplandı .

Çizelge 3.2 nin ilk iki sütununda madde belirlenmesi için kullanılan OKA-2 standartındaki elementler ve bunların yüzde miktarları görülmektedir; düşünceler kısmında ise gözlenebilen ve (miktarının azlığı , ürün çekirdeğin yarı ömrünün kısıtlılığı , uzunluğu veya çıkardığı gamaların şiddetinin yetersizliği, reaksiyon tesir kesitinin küçük olması ve girişim olayları nedeniyle) gözlenemeyen elementler işaret edilmiştir. Çizelge 3.3 ise kullanılan dört ayrı numune için elde edilen sonuçları vermektedir. Hesaplar ancak standart ve numunede gözlenebilen ortak elementler için yapılabilmektedir. Çizelgede bazı numunelerde gözlenen ancak standartta olmadığından miktarı saptanamayan elementler de bulunmaktadır.

Çizelge 3.4, 3.5, 3.6, 3.7 de deneysel sonuçlar daha önceki çalışmalarda bulunanlarla kıyaslanmıştır. Görüldüğü gibi değerler, demir ve europyum dışında birçok element için, diğer çalışmalarda elde edilenlerle, hata sınırları içinde, uyum-

Çizelge 3.2 OKA-2 standartında bulunan elementlerin konsantrasyonu.

Element	Konsantrasyon	Düşünceler
ThO_2	3.3	Gözlendi
LaO_2	5.6	Gözlendi
CeO_2	14.3	Gözlendi
Pr_6O_{11}	1.8	Gözlendi
Nd_2O_3	6.5	Gözlendi
SmO_3	1.0	Gözlendi
Eu_2O_3	0.2	Gözlendi
Gd_2O_3	0.8	Gözlendi
Tb_4O_7	0.05	Gözlendi
Dy_2O_3	0.2	Gözlenemedi
Er_2O_3	0.1	Gözlenemedi
SiO_2	13.0	Gözlenemedi
TiO_2	0.1	Gözlenemedi
Al_2O_3	0.3	Gözlenemedi
FE_2O_3	0.1	Gözlendi
MgO	0.2	Gözlenemedi
CaO	29.0	Gözlenemedi
Na_2O	0.2	Gözlenemedi
P_2O_5	18.0	Gözlenemedi
Tm_2O_3	0.002	Gözlendi
Yb_2O_3	0.002	Gözlendi
Lu_2O_3	0.002	Gözlendi
U	250ppm	Gözlendi
HO_2O_3	0.002	Gözlenemedi

ludur. Fe ve Eu miktarlarındaki çelişkili değerler tüm numunelerde kendisini göstermiştir. Fe için bulunan sonuçların 25-40 kat gibi bir farklılık gösterme nedeni anlaşılammıştır. Eu değerleri de diğer çalışmalarda elde edilenlerden 3-6 kat küçüktür. Bu uyumsuzluğun girişim olaylarından kaynaklandığı sanılmaktadır.

Bu çalışmada, diğer çalışmalarda (özellikle Togay'ın kinde) gözlenemeyen diğer bazı elementlerin de madde miktarı saptanmıştır. Çizelge 3.4 de görüldüğü gibi Togay'ın izotropik nötron kaynağı ile yaptığı çalışmada gözlenen element sayısı bu çalışmada belirlenenlerden çok daha azdır. Bu da bize, yüksek akıllı reaktörlerde yapılan aktivasyon analizlerinin üstün yanını göstermektedir.

Çizelge 3.3 Numunelerdeki elementlerin deneysel sonuçları

Element	KTS-1	KTS-2	KTS-3	KTS-4
Fe(g/kg)	1.04±0.11	2.41±0.40	1.03±0.31	0.78±0.11
La(g/kg)	5.34±0.66	11.68±1.95	4.94±0.36	17.43±0.48
Ce(g/kg)	18.06±1.65	15.70±1.22	6.28±1.67	14.71±1.33
Pr(g/kg)	3.43±1.58	—	—	—
Nd(g/kg)	14.42±0.64	3.92±0.88	1.92±0.63	2.74±0.11
Sm(g/kg)	2.57±0.33	0.48±0.09	0.31±0.08	0.37±0.06
Eu(mg/kg)	129±30	18.10±8.30	9.10±5.56	9.77±8.41
Gd(mg/kg)	—	699±235	—	541 ±309
Tb(mg/kg)	84±6	16.39±2.75	12±2	14.50±2.75
Yb(mg/kg)	55.40±3.20	20.30±4.30	17.88±3.46	31.90±3.52
Lu(mg/kg)	6.30±0.03	0.52±0.02	36.26±0.22	1.18±0.01
Th(g/kg)	7.70±0.10	3.33±0.25	3.69±0.20	2.21±0.18
U(mg/kg)	12.45±1.85	147.85±44.05	9.35±0.25	9.47±0.38
Sc	+	+	+	+
Cr	+		+	
Co	+	+	+	
Zn			+	+
Zr	+		+	+
Nb				+
Sb	+	+	+	+
Cs	+	+		
Ba	+	+	+	+
As	+			

+ : gözlenen elementler

Çizelge 3.4 KTS-1 deki sonuçların, diğer çalışmalarla karşılaştırılması

Element	Bu çalışma	MTA	Acar	Togay⁺
Fe(g/kg)	1.04±0.11	40.3	26.7±1.1	—
La(g/kg)	5.34±0.66	4.00	3.84±0.14	3.80±0.15
Ce(g/kg)	18.06±1.65	14.5	15.3±1.3	14.67±0.75
Nd(g/kg)	14.42±0.64	15.0	14.8±0.4	15.0±0.45
Sm(g/kg)	2.57±0.33	3.00	3.00±0.33	2.97±0.31
Eu(mg/kg)	129±30	700	370±15	0.68±0.02
Tb(mg/kg)	84±6	—	54.0±5.3	—
Yb(mg/kg)	55.4±3.2	40.0	62.6±4.2	—
Lu(mg/kg)	6.30±0.03	—	—	—
Th(g/kg)	7.70±0.10	5.7	5.3±0.2	5.75±0.17
U(mg/kg)	12.45±1.85	—	9.4±1.3	9.7±0.5
Pr(g/kg)	3.43±1.58	—	—	—

+ : Analiz izotropik nötron kaynağı kullanılarak yapılmış.

Çizelge 3.5 KTS-2 deki sonuçların diğer çalışmalarla karşılaştırılması .

Element	Bu çalışma	MTA	Acar
Fe(g/kg)	2.41±0.40	91.6	96.5±1.3
La(g/kg)	11.68±1.95	9.00	9.42±0.35
Ce(g/kg)	15.70±1.22	11.0	13.6±1.0
Nd(g/kg)	3.92±0.88	3.5	3.4±0.2
Sm(g/kg)	0.48±0.09	0.7	0.63±0.07
Eu(mg/kg)	18.1±8.3	70.0	71.1±2.9
Gd(mg/kg)	699±235	—	420±50
Tb(mg/kg)	16.39±2.75	—	12.5±0.9
Yb(mg/kg)	20.3±4.3	30.0	28.4±1.2
Lu(mg/kg)	0.52±0.02	—	—
Th(g/kg)	3.33±0.25	2.9	2.9±0.2
U(mg/kg)	147.85±44.05	170	181±10

ÇİZELGE 3.6 KTS-3 deki sonuçların, diğer çalışmalarla karşılaştırılması .

Element	Bu çalışma	MTA	Acar
Fe(g/kg)	1.03±0.31	28.0	26.0±5.8
La(g/kg))	4.94±0.36	4.00	4.35±0.28
Ce(g/kg)	6.28±1.67	—	4.8±0.3
Nd(g/kg)	1.92±0.63	0.15	1.3±0.1
Sm(g/kg)	0.31±0.08	0.02	0.15±0.03
Eu(mg/kg)	9.10±5.56	—	27.4±2.9
Yb(mg/kg)	17.88±3.46	—	21.9±1.2
Tb(mg/kg)	12±2	—	8.2±0.8
Lu(mg/kg)	36.26±0.22	36.2	36.2±4.3
Th(mg/kg)	3.69±0.20	—	2.9±0.2
U(Mg/kg)	9.35±0.25	8.48	8.01±0.40

Çizelge 3.7 KTS-4 deki sonuçların, diğer çalışmalarla karşılaştırılması .

Element	Bu çalışma	MTA	Acar
Fe(g/kg)	0.78±0.11	19.4	18.8±0.5
La(g/kg)	17.43±0.48	13.0	12.5±0.7
Ce(g/kg)	14.71±1.33	12.5	12.0±0.7
Nd(g/kg)	2.74±0.11	3.0	2.5±0.1
Sm(g/kg)	0.370±0.006	0.40	0.35±0.06
Eu(mg/kg)	9.77±8.41	40.0	41.3±1.9
Gd(mg/kg)	541±309	—	150±20
Tb(mg/kg)	14.50±2.75	—	11.3±0.7
Yb(mg/kg)	31.90±3.52	40.0	37.4±2.9
Th(g/kg)	2.21±0.18	2.0	1.5±0.2
U(mg/kg)	9.47±0.38	8.48	8.61±0.43

4.SONUÇ

Bu çalışmada saptanan madde miktarı , Eu ve Fe dışındaki elementler için, daha önce elde edilen değerlerle tutarlıdır. Eu elementi için çelişkinin, girişim olaylarından kaynaklandığı sanılmaktadır. Fe durumunda ise beklenenden çok daha düşük bir değer bulunma nedeni anlaşılamamıştır. Deneyde, elementlerin belirlenmesindeki hata çoğu aktivite için yarı ömürlerin de saptanmasıyla, en düşük düzeye indirilmiştir. Fe için de bozunum eğrisi çizilerek yarı ömür tayininden sonra, ışınlama bitimindeki aktivite belirlendiğinden, sonuçta böylesine büyük bir farklılık bulunması şaşırtıcıdır ve hatanın daha önceki çalışmalarda olabileceği şüphesini doğurmaktadır. Bu nedenle daha güvenilir analizlere gereksinim vardır.

Çalışma nötron aktivasyon analizinin eser halindeki madde belirlenmesinde başarılı olduğunu göstermiştir. Çalışma aynı zamanda reaktörlerde gerçekleştirilen ışınlamaların düşük akıllı nötron kaynakları ile yapılanlardan daha iyi sonuçlar verdiğini de ortaya koymuştur. Değerler, koşullar elverdiği ölçüde, bozunum eğrileriyle elde edilmiştir. Ancak eğrilerdeki nokta sayısının, saymaların yabancı laboratuvarlarda gerçekleştirilmesi ve süresinin uzunluğu nedeniyle azlığı, daha güvenilir sonuçlar alınmasını engellemiştir.

Çalışmada element sayısı çok olduğundan analizde güçlüklerle karşılaşmıştır. Bu nedenle tüm elementlerin tek ışınlama ile analizi yerine numuneyi parçalara

bölerek madde saptamalarını gruplar halinde yapmada yarar vardır. Ancak bu yöntemin de fazla ışınlama süresi ve birden fazla standart gerektireceğinden, uygulamada güçlük doğurabileceği açıktır.

Deneyde, standartda olmayıp numunede bulunan elementler gözlenmiştir. Bunların kıyaslama yöntemi ile elde edilemeyeceği açıktır. Bu belirlemeler, ileriki çalışmalarda, *mutlak yöntem* kullanılarak yapılabilir. Bu yöntem, şu anda var olan deneysel sınırlamaları daha da artırabilir, ancak soruna, yabancı laboratuvar olanakları yerine kendi sayma sistemlerimizi kurarak, bir ölçüde çözüm getirilebilir. Bunun , ölçü sayısı arttırılabileceğinden daha duyarlı sonuçlar vereceği de açıktır.

KAYNAKLAR

- AARNIO,P.A.,ROUTTI,J.T. and SANDBERG,J.V.,1989.,”MicroSampo-Personel Computer Based Advanced Gamma Spectrum Analysis System.” Jour. of Radio-Anal. and Nuc. Chem.,Articles, cilt;124,N.2, 457-466.
- ADAM P.ARYA ,1966. Fundamentals of Nuclear Physic.West Virginia University.
- ACAR O.,1988.”Determination of Rare Earths in Beylikahir Thorium Deposits by Neutron Activation Analysis Technique”. M.S.Thesis,Middle East Technical University,Nuc.eng.Department.
- ARAS K.N.AND ANDERSON D.L.1987.Nuclear Activation Analysis Techniques,April 1987.
- ÇELENK I.,1986. ”5 Ci Pu-Be Nötron Kaynağı kullanılarak Aktivasyon analizi ile Analizi Mümkün Olan Elementlerin Araştırılması ve Bu elementlerin dedeksiyon limitinin Tesbiti.” Yüksek Lisans Tezi,Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- COVELL D.F.,1959. Determination of Gamma Ray Abundance Directly From The Total Absorption Peak.Anal.Chem.cilt 31.no.11. 1785.
- GARDNER P.P., 1967.Radioisotope Measurement Applications in Engineering, Reinhold Publishing Corporation,USA.
- GUNNINK R.,NIDAY J.B.,1972.”GAMANAL” Report UCRL, cilt 1,Lawrance Livermore Laboratory.
- KAPLAN I.,1963.Nuclear Physics.Department of Nuclear Engineering Massachusetts Institute of Technology.Addison wesley Publishing Company,inc.
- KOCH R.C.1960.Activation Analysis Handbook.Academic Press Inc.,London. LED-ERER C.M.,SHIRLEY V.D., 1978.Table of Isotopes, John Wiley and Sons,inc.,Canada.

LENIHAN J.M.A., THOMSON S.J., v.d., 1972. *Advances in Activation Analysis*, Academic Press inc. Limited, London.

MILASLOW R. 1970. *Activation Analysis*, The Chemical Rubber Co., USA

MTA 1964 Fizibilite Endüstri Dairesi Başkanlığı Bilimsel ve Teknik Yayın Serisi N.5, Ankara.

PHLLIPS G.W. And MARLOW K.W., 1976. *Automic Analysis of Gamma-Ray Spectra From Germanium Detectors*, Nuc.Inst. and Meth., 137, 525.

SINGRU R.M. 1972 *Introduction to Experimental Nuclear Physics*, Wiley Eastern Private Limited. 7, 96-125.

TOGAY Y.E. 1989. "Development of a Computer Program for Analysis of Gamma Ray Spectra and its Use in Instrumental Neutron Activation Analysis." A Master's Thesis, Middle East Teachnical University.

Universitetsforlaget, 1971. *Activation Analysis in Geochemistry and Cosmochemistry*. 222.

EK-A Girişim yapan elementler.

Element	İzotop	$t_{1/2}$	bazı enerjileri (Kev)	Girişim yapan çekirdek	$t_{1/2}$	Girişim enerjisi (Kev)
La	La^{140}	40.3saat	329(20), 487(40), 815(19), 1596(96)			
Ce	ce^{141}	32.5gün	145(48)			
	Ce^{143}	33.0gün	293(46), 668(7), 725(8)	Er^{171} Tb^{160} Eu^{154}	7.5saat 72.1saat 16yıl	296(28) 299(30) 724(21)
Pr	Pr^{142}	19.2saat	1572(3.7)			
Nd	Nd^{147}	11.1gün	91(28), 319(3) 531(13)	Lu^{177m}	155gün	319(10)
Sm	Sm^{153}	47.0 saat	103(28)	Lu^{177m}	155gün	105(13)
Eu	Eu^{152m}	9.3saat	122(37), 344(2.5) 842(13), 963(12)	Er^{171} Pm^{151} Tb^{160}	7.5saat 27.8saat 72.1gün	124(9) 340(21) 960(31)
	Eu^{154}	16yıl	123(38), 724(21) 876(12), 1000(31) 1278(37)	Ce^{143} Tb^{160}	33.0saat 72.1gün	725(8) 879(31), 1272(7)
Gd	Gd^{153}	242gün	99(55)			
Tb	Gd^{159}	18.5saat	363(9)	Dy^{165} Tm^{170}	2.35saat 130gün	361(1.1) 84(3.3)
	Tb^{160}	72.1gün	87(12), 299(30), 879(31), 966(31), 1178(15)	Eu^{154} Eu^{152}	16yıl 12.7yıl	876(12) 965(15)
Dy	Dy^{165}	2.35yıl	95(4), 361(1.1)	Gd^{159}	18.5saat	363(9)
Er	Er^{171}	7.5saat	112(25), 124(9), 296(28), 308(63)	Lu^{177} Yb^{169} Yb^{175} Eu^{152m_1} Ce^{143}	6.8gün 32.0gün 4.2gün 9.3saat 33.0saat	113(2.8) 110(18), 308(10), 114(1.9) 122(8) 293(46)
				Lu^{177}	6.8gün	113(2.8)
				Lu^{177m}	155gün	113(23), 128(17) 174(13)
				Lu^{177}	6.8gün	113(2.8)
				Lu^{177m}	155gün	113(23), 281(14)
Yb	Yb^{169}	32gün	63(45), 110(18) 131(11), 177(22) 198(35), 308(10)	Lu^{177} Lu^{177m}	6.8gün 155gün	113(2.8) 113(23), 128(17) 174(13)
	Yb^{175}	4.2gün	114(1.9), 283(3.7) 396(6)	Lu^{177} Lu^{177m}	6.8gün 155gün	113(2.8) 113(23), 281(14)
Lu	Lu^{177}	6.8gün	113(2.8), 208(6.1)	Yb^{175}	4.2gün	114(1.9)

EK-B Standartta Bulunan Elementlere Ait Bilgiler

Element (Z)	Kararlı İzotop	Bolluğu (%)	Ürün Çekirdek	σ (barn)	$t_{1/2}$	Başlıca Enerjileri (binde par.)
Na(11)	Na^{23}	100	Na^{24}	0.528 ± 0.005	15saat	1368.5(1000) 2754.1(1000)
Mg(12)	Mg^{26}	11.17	Mg^{27}	$(38 \pm 3)10^{-3}$	9.5dk	170.8 843.8 1014.4
Al(13)	Al^{27}	100	Al^{28}	0.232 ± 0.003	2.3dk	1778.9(1000)
Si(14)	Si^{30}	3.09	Si^{31}	0.105 ± 0.005	2.62gün	1266.2(1000)
P(15)	P^{31}	100	P^{32}	0.190 ± 0.010	14.3gün	—
Ca(20)	Ca^{44}	2.06	Ca^{45}	1.1 ± 0.3	165gün	$12.4(31 * 10^{-5})$
	Ca^{46}	0.0033	Ca^{47}	0.7 ± 0.2	4.53gün	489.5 1296.
	Ca^{48}	0.18	Ca^{49}	1.1 ± 0.1	8.8dk	2061.0 2572.0 3083.0 4071.0
Ti(22)	Ti^{50}	5.34	Ti^{51}	0.179 ± 0.003	5.8dk	320.0(1000) 608.4(15) 928.5(44)
Fe(26)	Fe^{54}	5.82	Fe^{55}	2.5 ± 0.4	2.6yıl	
	Fe^{58}	0.33	Fe^{59}	1.14 ± 0.05	45gün	1099.3(1000) 1291.6(770)
La(57)	La^{139}	99.911	La^{140}	9.0 ± 0.3	40.2gün	487.0(460) 815.8(240) 1596.2(970)
Ce(58)	Ce^{140}	88.44	Ce^{141}	0.58 ± 0.06	33gün	145.4(493) 293.2(430)
	Ce^{142}	11.07	Ce^{143}	1.1 ± 0.3	33gün	664.5(125) 721.9(122)

Element (Z)	Kararlı İzotop	Bolluğu (%)	Ürün Çekirdek	σ (barn)	$t_{1/2}$	Başlıca Enerjileri (binde par.)
Pr(59)	Pr^{141}	100	Pr^{142m}	3.9 ± 0.5	14.6dk	508.8(62)
	Pr^{141}	100	Pr^{142g}	11.5 ± 1.0	19.2saat	1575.5(30)
Nd(60)	Nd^{146}	17.18	Nd^{147}	1.4 ± 0.2	11.1gün	91.4(270) 319.4(20) 531.0(130)
	Nd^{148}	5.72	Nd^{149}	2.5 ± 0.2	1.8saat	114.3(161) 211.3(234) 270.1(92)
Sm(62)	Sm^{152}	26.53	Sm^{153}	210 ± 10	47saat	103.2(270)
	Sm^{154}	22.53	Sm^{155}	5.5 ± 1.1	23dk	104.2(646) 141.2(19) 245.6(45)
Eu(63)	Eu^{151}	47.82	Eu^{152m}	2860 ± 300	9.3saat	121.9(50) 344.0(17) 841.3(111) 963.1(93)
			Eu^{152}	5300 ± 300	12yıl	344.1(285) 779.0(145) 964.2(162) 1408.1(229)
	Eu^{153}	52.23	Eu^{154}	400 ± 100	16yıl	122.9(400) 723.2(210) 996.3(113) 1274.5(370)
Gd(64)	Gd^{152}	0.21	Gd^{153}	1100 ± 100	242gün	97.4(515) 103.1(390)
	Gd^{158}	24.87	Gd^{159}	3.5 ± 1.0	18saat	274.2(5) 363.3(1000)
Tb(65)	Tb^{159}	100	Tb^{160}	25 ± 5	72.1gün	879.3(318) 966.0(276) 1178.1(166)
Dy(66)	Dy^{164}	28.18	Dy^{165}	2600 ± 300	139dk	94.7(37) 279.6(6) 361.5(10)
Er(68)	Er^{168}	27.07	Er^{169}	1.9 ± 0.2	9.4gün	1097.0(0.13) 1182.0(0.01)
	Er^{170}	14.88	Er^{171}	6 ± 1	7.52saat	111.6(250) 295.6(280) 308.2(630)
Tm(69)	Tm^{169}	100	Tm^{170}	106 ± 5	130gün	84.3(34)

Element (Z)	Kararlı İzotop	Bolluğu (%)	Urün Çekirdek	σ (Barn)	$t_{1/2}$	Başlıca Enerjileri (binde parca.)
Yb(70)	Yb^{168}	0.14	Yb^{169}	3200 ± 400	32gün	110.0(178) 130.7(112) 177.0(202) 197.8(349)
	Yb^{174}	31.84	Yb^{175}	65 ± 5	101saat	113.5(19) 282.6(37) 396.1(60)
Lu(71)	Lu^{176}	2.6	Lu^{177}	2100 ± 50	6.7gün	112.9(44) 208.3(75)
Th(90)	Th^{232}	100	Th^{233}	7.4 ± 0.1	22.2dk	94.7(30) 459.2(52) 669.8(25)
Pa(91)	Pa^{233}		Pa^{233}		27gün	311.8(100) 340.4(11.5)
U(92)	U^{238}	99.27	U^{239}	2.72 ± 0.03	23.5dk	
Np(93)	Np^{239}		Np^{239}		2.35gün	209.8(24) 228.2(84) 277.6(100)

W. G.
Yükseköğretim Kuruluna
Dokümantasyon Merkezi