

17711

T.C
İstanbul Üniversitesi
Fen Bilimleri
Enstitüsü

GAMMA SPEKTROMETRESİ İLE ALUMİNYUM
ALAŞIMLARINDA ATOMİK DİFÜZYON ÖLÇÜMÜ

DOKTORA TEZİ

(Fizik Anabilim Dalı-Nükleer Fizik Programı)

Gazanfer BİRDAL

Danışman : Prof. Dr. K. Gediz AKDENİZ

Eylül 1991

TEŞEKKÜR

Uzun ve zorlu geçen doktora çalışmamda ;karşılaştığım idari ve teknik engelleri aşmamı sağlayan ,lisans ve lisansüstü eğitimimden itibaren beni bilgilendiren ,yol gösteren hocalarım , Prof. Dr. Gediz AKDENİZ ve Prof. Dr. R. Selman KINACI ya teşekkür ederim.

Çalışmamda maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen hocalarıma ,arkadaşlarıma ve tezin yazım ve grafik işlemlerini yapan oğlum Özgür'e ayrıca teşekkür ederim.



GAMMA SPEKTROMETRESİ İLE ALUMİNYUM ALAŞIMLARINDA ATOMİK DİFÜZYON ÖLÇÜMÜ

ÖZET

Bu çalışmada, alüminyum alaşımlarında atomik difüzyon ve ölçüm yöntemleri incelenmiştir. Difüzyon denklemlerinin çözümlerinden , deney koşullarına en uygun olan , yarı sonlu difüzyon sistemi için geçerli olan kararsız difüzyon denklemi

$$C = \frac{S}{\sqrt{\pi \cdot D \cdot t}} \exp\left(-\frac{x^2}{4 \cdot D \cdot t}\right)$$

düzenlenmiştir. Kesit alma yöntemiyle tesbit edilen gözlem sonuçlarının $C=F(x)$, $\log C=F(x^2)$ grafikleri ile analizi yapılmış ve en küçük kareler yöntemi kullanılarak $C = C_0 \cdot \exp(-a \cdot x^2)$ tipinde deneysel difüzyon denklemleri oluşturulmuştur.

Teorik ve deneysel denklemlerin ortaklaşa kullanımı sonucunda , her bir örneğin difüzyon katsayısı bulunmuştur. Bu difüzyon katsayılarının her bir örnekte alüminyum alaşım yapısına ve yayınan atom türüne göre değiştiği tesbit edilmiştir. Bu çalışmada , 350-450 °C arasında olan ısıtma işlem sıcaklığında ^{64}Zn ^{65}Zn ^{63}Cu ^{109}Ag ^{110}Ag ^{24}Mg ^{60}Co atomlarının difüzyon katsayıları 10^{-8} - 10^{-9} mertebesinde bulunmuştur. Bulunan bu değerlerin saf alüminyumda yayınma durumundaki difüzyon katsayısından büyük oluşu ve ayrıca deneysel difüzyon denklemlerinde , korelasyon katsayısının aldığı değerler ölçüm sonuçlarının kabul edilir doğrulukta olduğunu göstermiştir.

Deneyde karşılaşılan oksidasyon sorunu hazırlanan difüzyon düzenekleri ile giderilmeye çalışılmış , basit sistemler olmasına rağmen , ölçüm sonuçları beklenen düzeyde elde edilmiştir.

DIFFUSION OF ATOMIC IN ALUMINUM ALLOYS MEASUREMENT WITH GAMMA SPECTROMETER

ABSTRACT

In this study we examined ,diffusion of atomic in aluminum alloys and measurement methods. The solution of general equation ,

$$C = \frac{S}{\sqrt{\pi \cdot D \cdot t}} \exp\left(-\frac{x^2}{4 \cdot D \cdot t}\right)$$

which was used in this work for semi-infinite diffusion systems.

Diffusion of impurities in aluminum alloys has been studied by tracer-sectioning techniques. The experimental results were used for $C=F(x)$ and $\log C=F(x^2)$ and experimental diffusion equation was found to be $C = C_0 \exp(-a \cdot x^2)$ from the least-squares methods.

Diffusion effect was investigated in ,350-450 °C. It was seen ⁶⁴Zn ,⁶⁵Zn ,⁶³Cu ,¹⁰⁹Ag ,¹¹⁰Ag ,²⁴Mg ,⁶⁰Co diffusion coefficients for aluminum alloys bigger than pure aluminum. The correlation factors were calculated for experimentall results and it was seen that measurements are in good agreement.

In this study has show that the surface oxide on aluminum alloy can perturb the diffusion penetration plots and producing the anomalously low diffusion coefficients. In this study ,simple diffusion system was used and taken good result.

İÇİNDEKİLER

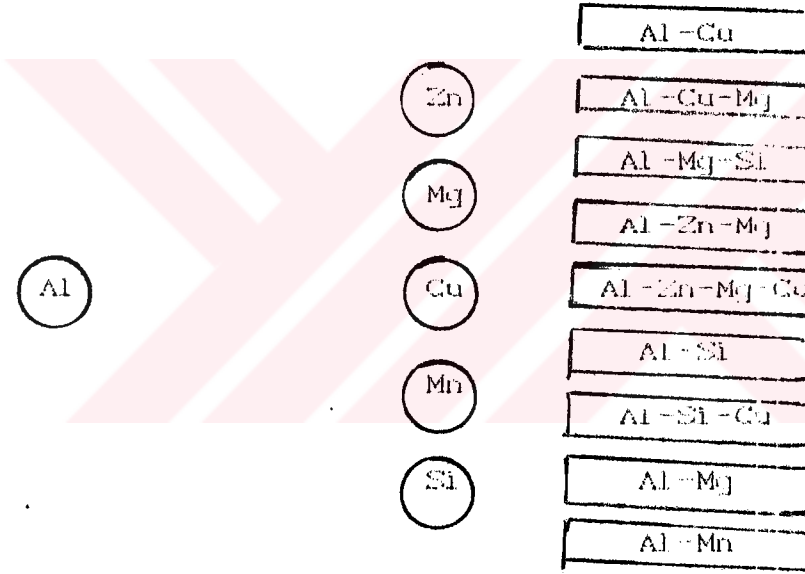
	<u>SAYFA</u>
TEŞEKKÜR	I
ÖZET	II
ABSTRACT	III
 BÖLÜM 1 GİRİŞ.....	 1-2
 BÖLÜM 2 KÜTLE DİFÜZYON TEORİSİ.....	 3-4
2.1 Difüzyon Denklemleri.....	4-6
2.2 Bir Boyutlu Kütle Difüzyon Denklemlerinin Çözümü.	6-7
2.2.1 Fick'in Birinci Difüzyon Denkleminin Çözümü.....	8-12
2.2.2 Fick'in İkinci Difüzyon Denkleminin Çözümü.....	12-13
2.2.2.1 Difüzyon Katsayısının Sabit Durumunda Çözümü.....	13-17
2.2.2.2 Difüzyon Katsayısının Değişken Olması Durumunda..	
Çözüm.....	17-20
 BÖLÜM 3 DENEYSEL DİFÜZYON BAĞINTILARI.....	 20-23
3.1 Difüzyon Katsayısı Ve Faktörleri.....	23-25
3.2 Difüzyon Aktivasyon Enerjisi Ve Elastik Modül....	
Bağıntıları.....	25
3.3 Erime Noktası İle Kristal Yapı Arasındaki.....	
Bağıntılar.....	25-26
3.4 Alaymlarda Self Difüzyon Ve Yabancı Atom.....	
Difüzyonu.....	26
3.4.1 Atomik Büyüklük Faktörü.....	26
3.4.2 Elektronegativite Faktörü.....	26-27
3.4.3 Bağlı Değerlik Faktörü.....	26
3.4.4 Kristal Yapı Faktörü.....	26-30

BÖLÜM 4	DİFÜZYON MEKANİZMASI.....	30-39
BÖLÜM 5	DİFÜZYON ÖLÇÜM YÖNTEMLERİ.....	39-42
5.1	Kesit Alma Yöntemi.....	42
5.2	Kalan Aktivite Metodu.....	42-44
5.3	Yüzey Azaltma Metodu.....	44
5.4	Otoradyografi Tekniği.....	45-46
BÖLÜM 6	ALUMİNYUM ALAŞIMLARINDA ATOMİK DİFÜZYON ÖLÇÜM.....	
	YÖNTEMLERİ.....	46-49
6.1	DeneySEL Sistemler ve Ölçüm Yöntemleri.....	49
6.1.1	Atomik Emisyon Spektrometresi.....	49-54
6.1.2	Gamma Spektrometresi.....	54-59
6.2	Aluminyum Alaşımında Zn ,Cu ,Ag ,Mg ,Co Difüzyonu ve Analizi.....	59-63
6.2.1	Çinko Difüzyonu.....	63-75
6.2.2	Bakır Difüzyonu.....	75-79
6.2.3	Gümüş Difüzyonu.....	79-87
6.2.4	Magnezyum Difüzyonu.....	87-90
6.2.5	Kobalt Difüzyonu.....	90-94
BÖLÜM 7	SONUÇ.....	95
EKLER		
	En Küçük Kareler Yöntemi ve Korelasyon Katsayısının Hesabı	
	Bilgisayar Yazılımı.....	96-99
	Sabit Değerler.....	100-109
	ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	110-112
	KAYNAKLAR.....	113-114

1 - GİRİŞ :

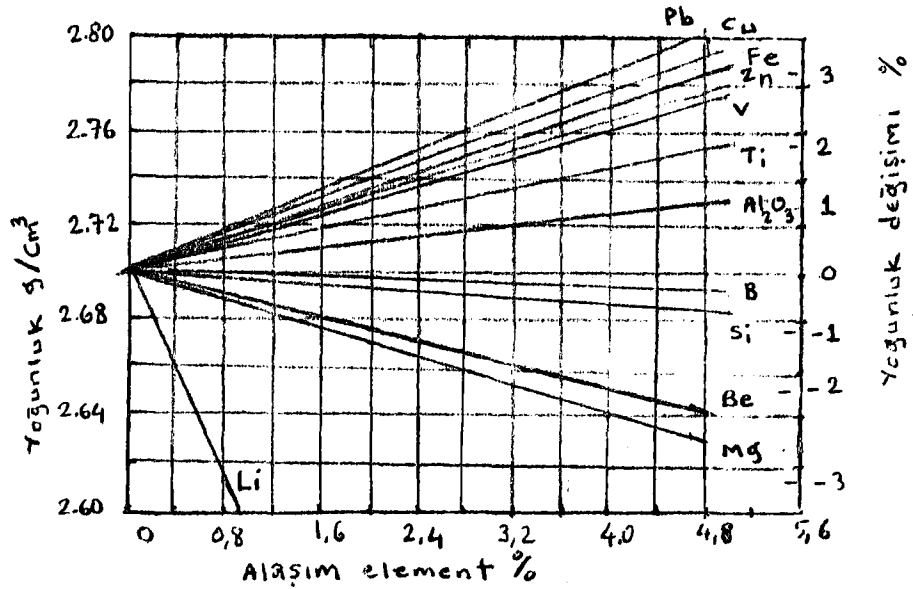
Alüminyum ve Alüminyum Alaşımlarında self difüzyon veya diğer elementlerin atomlarının yayılımı Endüstriyel uygulamalarda, kristal yapıdaki değişikliklerden başlayarak makroskopik yapıya uzanan bir etkiyle ilgili incelemek ve bulunan sonuçlardan Teknolojik yararlar sağlamak, yeni bilgiler edinmek amacıyla, sürekli araştırılan bir konudur. Genel olarak metallerde atomik difüzyonun analizi için kullanılan, kesit alma, yüzey azaltma, otoradyografi gibi yöntemler Alüminyum Alaşımlarında atomik difüzyonun incelenmesi için de kullanılır.

Alüminyum % 99,50-99,79 ticari saflıkta veya % 99,99 super saflıkta, yüzey merkezli kübik yapıli kristallerin oluşturduğu katı bir metal durumunda iken, oda sıcaklığında bile titreşen atomlarının yer değiştirmesi ile difüzyon olayı başlar. Sıcaklık artırılarak erime sıcaklıklarına ulaşıldığında, şekil 1.1 de görülen bir kısım metalle-Alüminyum, yaygın olarak kullanılan Alüminyum Alaşımlarını oluştururlar.



Şekil: 1.1 Başlıca Alüminyum Alaşımları

Şekildeki Alüminyum Alaşımlarında ki metaller ekonomik oluşları nedeniyle tercih edilirler. Ancak gerektiğinde Alüminyum veya Alüminyum Alaşımı içine, Ag, Co gibi elementlerin de difüzyonunu sağlayarak, iletkenlik, sertlik gibi özellikleri farklı yeni alaşım yapıları elde edilebilir. Alüminyum Alaşımının yoğunluğu içindeki elementlerin % miktarına göre değişir. Örneğin ikili Alüminyum Alaşımlarının yoğunluğunun katkı elementlerinin % miktarına göre değişimi şekil 1.2 de görüldüğü gibi olmaktadır.



Şekil: 1.2 İkili Alüminyum Alaşımları yoğunluğu

Şekil 1.2 den de görüldüğü gibi, katkı elementlerinin % miktarı artımı, bazı alaşımların, yayının sırasındaki sıcaklık, basınç gibi etkenlere, yayan, yayınan atomların büyüklüğü, valans değeri gibi özelliklere bağlı olarak alaşımın kristal yapısı, yoğunluğu, erime sıcaklığı değişir. Genellikle katkı elementlerinin % miktarı arttıkça, Alüminyum Alaşımlarının; elektrik dirençleri artar, uzama katsayısı büyür. Termal genleşme katsayısı, Magnezyum, Çinko katkılarda büyüür, Alüminyumoksit, Silisyum, Demir, Nikel gibi katkılarda küçülür, magnetik suseptibilitesi, ışıltı yansıtıcılığı artar.

Deneysel gözlemler, tek fazlı bir madde sisteminin, başlangıçta homojen olamayan bir yapıda iken, ortam koşullarının dengede tutulması durumunda, bir süre sonra homojen bir yapıya kavuştuğunu göstermektedir. Örneğin belirli bir hacimdeki su-mürekkep karışımı, veya duman doldurulmuş bir odada, belirli bir süre sonra sıvı karışımı veya duman homojen bir yapıda olacaktırlar. Ancak katılarda benzer olay gerçekleşmesine rağmen, gözlemek çok zor olmaktadır. Katı madde atomlarının titreşim enerjilerinin, potansiyel engellerini aşmasını sağlama durumu, atomik yerleşim düzeni, mikro yapıdan, makro yapıya doğru katı yapıdaki önceden olmuş veya difüzyon olayı anında olan yapı değişikliğinden etkilenme homojen bir yapı oluşumunu gözlemeyi zorlaştırmaktadır. Metallerde difüzyon, yapıda bulunan element atomlarının, çok yoğun bölgeden az yoğun bölgeye hareketi ile olur. Diğer metallerde olduğu gibi, Alüminyum Alaşımlarında atomik difüzyon incelemesi, yayının hızı, atomların kristal yapı içinde nasıl hareket ettikleri, göç eden atom miktarı ve menziline ölçülmesi gibi konuları kapsamaktadır.

Bu çalışmada, Alüminyum Alaşımlarında çinko, bakır, gümüş, kobalt gibi elementlerin difüzyonu belirli sıcaklıklarda, geçirtili teknik ve ölçüm yöntemleri ile incelenerek, literatürdeki deneysel, teorik sonuçlarla karşılaştırma yapılmış ve sonuçların radyoaktif maddeli gereçler de uygulamaya konularak değerlendirilmesi amaçlanmıştır.

2 - KÜTLE DİFÜZYON TEORİSİ :

Maddelerin, gaz, sıvı ve katı durumda, kendi ortamında veya başka bir madde içerisine yayılımı geçen yolla incelenebilir. Adolf Fick tarafından 1855 yılında difüzyon teorisinin temelleri atılmış, daha sonraki çalışmalar ve uygulamalar ile elementlerin atomik yayılımı daha anlaşılır hale gelmiştir.

Kütle yayılımı; Fizik'in temel prensiplerinden biri olan, korunum prensibinden hareket ederek oluşturulabilen matematik modellerle incelenebilir. Bazı maddenin; V hacimli maddi ortamda $\vec{V}$ hızıyla hareket ederek, bu hacmin S yüzeyinden, birim hacimde ϵ yoğunluğa sahip olacak şekilde t sürede, j akısı ile yayındığını göz önüne alarak,

$$\begin{array}{lcl} \text{V hacimde} & & \text{Sınır yüzeyden} \\ \text{biriken toplam} & = & \text{V hacmine giren} \\ \text{madde miktarı} & & \text{madde miktarı} \end{array} + \begin{array}{lcl} \text{V hacimde} & & \\ \text{önceden olan} & & \\ \text{madde miktarı} & & \end{array} \quad (2-1)$$

$$\frac{d\epsilon}{dt} + \epsilon \nabla \cdot \vec{V} = - \nabla \cdot \vec{j} + I \quad (2-2)$$

esitlikleri yazılabilir. Burada; sınır yüzeyde ds yüzeyinin $\vec{n}$ normaline ters yönde madde akı vektöründen dolayı j nin işareti - alınmıştır. Karma maddeli bir ortamda $\epsilon \equiv \rho_k$ olarak

$$\rho = \sum_{k=1}^n \rho_k \quad (2-3)$$

$$\frac{d\rho_k}{dt} + \rho_k \nabla \cdot \vec{V} + \nabla \cdot \vec{j}_k = I_k \quad (k=1,2,\dots,n) \quad (2-4)$$

alınabilir. Eğer V hacimli maddenin $\vec{V}$ hızı sıfırsa, V hacmi uzayda sabittir ve kütle korunumunda göz önüne alarak; ρ , V hacimli maddenin yoğunluğu; $\xi = \rho_k / \rho$ k inci bileşenin kütle kesri olmak üzere; 2-4 eşitliği

$$\rho \frac{d\xi}{dt} + \nabla \cdot \vec{j} = I \quad (2-5) \text{ yazılabilir.}$$

V hacimli madde ortamında yayılan atomların yayınması, akışı, her fiziksel madde akışı olayını enerji, kütleyi meydana getiren seçilen T potansiyeline (sıcaklık, yoğunluk) bağlıdır. Ortamda bu potansiyel dağılımı düzgün değilse, deneysel olarak saptanmıştır ki madde akışı azalan potansiyel bölgesine doğrudur. Temel gözlemler, madde akışı ile potansiyel gradyanı arasında lineer bir bağıntı göstermektedir.

Örneğin, fourier ısı iletim yasası; ısı iletimini ile sıcaklık gradyanı arasında, Fick yasası da kütleye difüzyonunda, kütleye akışı ile yoğunluk gradyanı arasında lineer bir bağıntı olduğunu açıklamaktadır. [1]

Sıvı halde, ortamdaki moleküllerin rastgele hareketleri ile, metalde elektronların sürüklenmesiyle, yüksek sıcaklıktaki bir bölgeden alçak sıcaklıktaki bir bölgeye ısı difüzyonu (ısı iletimini) gerçekleşir. Kütleye transferinde moleküllerin, atomlarının rastgele hareketleriyle, bir ortamda kütleye difüzyonu (yayınımı) meydana gelir. Bir katı madde ortamında, difüzyon; kütleye yoğunluğu büyük olan A bölgesinden, kütleye yoğunluğu küçük olan bir B bölgesine doğru meydana gelir. Fick tarafından önerilen

$$\vec{J} = -D \nabla C(\vec{r}, t) \quad (2.6)$$

denklemini ile bu difüzyon incelenebilir.

Burada $\vec{J}$, kütleye akı vektörüdür, $C(\vec{r}, t)$ yayılan madde yoğunluğu, $\nabla C(\vec{r}, t)$ bu madde yoğunluğunun gradyanı, D difüzyon katsayısıdır.

Eşitlikteki değişken ve sabitlerin birimleri ;

$C(\vec{r}, t)$	kg/m^3
x	m
J	$\text{kg/m}^2 \cdot \text{s}$
D	$\frac{\text{m}^2}{\text{s}}$

olarak alınabilir.

Gaz halindeki iki maddenin birbirine difüzyonu için de çeşitli matematik modeller geliştirilmiştir. [2] Ancak sıvı durumunda iki maddenin birbiri içinde yayınımı için, sıvının kabındaki gözenekler ve kapiler etkinin karmaşık etkisinden, henüz kesin matematik modeller (teori) geliştirilememiş, deneysel yaklaşımlarla difüzyon katsayısının saptanabildiği denklemler kullanılmaktadır. [3]

2 - 1 Difüzyon Denklemleri

Hacmi V olan, izotop bu ortamda yayılan kütleye konsantrasyonu zamanla değişiyorsa (kararsız yayınımı) kütleye yayınımı $\frac{dC}{dt} > 0$ da,

$$\frac{dC(\vec{r}, t)}{dt} = \nabla [D(\vec{r}) \nabla C(\vec{r}, t)] + q(\vec{r}, t)$$

(2.7)

eşitliği (Fick 2. yasası) ile incelenebilir.

Difüzyon katsayısının V hacminin her yerinde aynı olduğu durumda $D(\vec{x}) = D = \text{sabit}$

(2.7) eşitliğini sadeleştirerek $t > 0$ için

$$\frac{1}{D} \cdot \frac{dc(\vec{x}, t)}{dt} = \nabla^2 c(\vec{x}, t) + \frac{1}{D} q(\vec{x}, t) \quad (2.8)$$

şeklinde döner. Burada $q(\vec{x}, t)$ terimi $\text{kg/m} \cdot \text{saat}$ biriminde, oluşan kütleyi (veya göken) belirtmektedir. $q(\vec{x}, t)$ pozitif veya negatif olabilir. Difüzyon katsayısının Fiziki anlamı, ortamdaki difüzyon hızı anlamında gelmektedir. Yüksek difüzyon katsayısı değeri, ortama kütle difüzyonunun daha hızlı gerçekleştiğini belirtir.

Difüzyon denklemlerinin çözümünde, üç tür lineer sınır koşulundan hareket edilir. Birinci sınır koşulu; kütle yoğunluğunun yüzeyde toplanması durumudur. Bu durumda

$$C(\vec{x}, t) = \phi(\vec{x}, t) \quad \vec{x} \in S \quad (2.9)$$

dir. Burada $\phi(\vec{x}, t)$, Sınır yüzeyinde kütle yoğunluğudur.

İkinci sınır koşulu; kütle akısının sınır yüzeyde sınırlanması durumudur.

$$D(\vec{x}) \frac{dc(\vec{x}, t)}{d\vec{n}} = \phi(\vec{x}, t) \quad \vec{x} \in S \quad (2.10)$$

Eşitliği ile, $d/d\vec{n}$; $\vec{n}$ yüzeyden çizilen normalin türevini göstermek üzere, difüzyon incelenebilir.

S yüzeyinde, üçüncü sınır koşulu, sınır yüzeyler arasında ve etraflarında taşıma (aktarma) ile difüzyon oluşumudur. Bu durumda, kütle difüzyonu

$$c(\vec{x}, t) + \frac{D(\vec{x})}{h} \cdot \frac{dc(\vec{x}, t)}{d\vec{n}} = \phi(\vec{x}, t) \quad \vec{x} \in S \quad (2.11)$$

eşitliği ile incelenebilir. Burada h , analitik ve deneysel işlemlerle elde edilebilen kütle transfer katsayısıdır. Homojen sınır koşullarında (2.9) (2.10) ve (2.11) eşitliklerinde $\phi(\vec{x}, t) = 0$ dir.

Yukarıda belirtilen üç sınır koşulunda kütle difüzyonu genel denklem

$$\delta C(\vec{x}, t) + \gamma D(\vec{x}) \frac{dC(\vec{x}, t)}{d\vec{n}} = \phi(\vec{x}, t) \quad x \in S \quad (2.12)$$

olarak yazılabilir.

δ , γ ve $\phi(x, t)$ değerleri,
 birinci sınır koşulunda; $\delta = 1$ $\gamma = 0$
 $\phi(x, t) = \text{sınır yüzeyde kütleye yoğunluğu}$
 ikinci sınır koşulunda; $\delta = 0$ $\gamma = 1$
 $\phi(x, t) = \text{sınır yüzeyde kütleye akısı}$
 üçüncü sınır koşulunda; $\delta = 1$ $\gamma = \frac{1}{h}$
 $\phi(x, t) = \text{gevre a kının kütleye yoğunluğu}$
 şeklinde göz önüne alınmalıdır.

Kütle difüzyon denkleminin bir boyutlu genel denklemi, düzlem (kartezyen), silindirik ve küresel koordinat sisteminde geçerli olmak üzere (2.8) ve (2.12) eşitliklerinden, x_0, x_1, t koşulunda

$$\frac{1}{D_0} \frac{dC(x, t)}{dt} = \frac{1}{x^n} \frac{d}{dx} \left[x^n D^*(x) \frac{dC(x, t)}{dx} \right] + \frac{1}{D_0} q(x, t) \quad (2.13)$$

$x = x_k$ durumunda ($k=0, 1$)

$$\delta_k C(x_k, t) - (-1)^k \gamma_k D(x_k) \frac{dC(x_k, t)}{dx} = \phi_k(t) \quad (2.14)$$

$x_0 \leq x < x_1$ durumunda

$$C(x, 0) = f \quad (2.15) \quad \text{olarak}$$

kullanılabilir.

2.13 denkleminde, $D^*(x) = D(x) / D_0$ dönüşümü yapılmıştır

Kesit düzlem şeklindeki madde için $n=0$, silindirik çubukteki madde için $n=1$ alınarak difüzyon denklemlerinin çözümleri gerçekleştirilebilir. (Küresel hacimli ortamda $n=2$ dir)

2 - 2 Bir boyutlu kütle difüzyon denklemlerinin çözümü ve uygulamada varılan pratik sonuçlar

Difüzyon denklemlerinde; düzlem şekiller için karteziyon koordinatlar kullanılarak

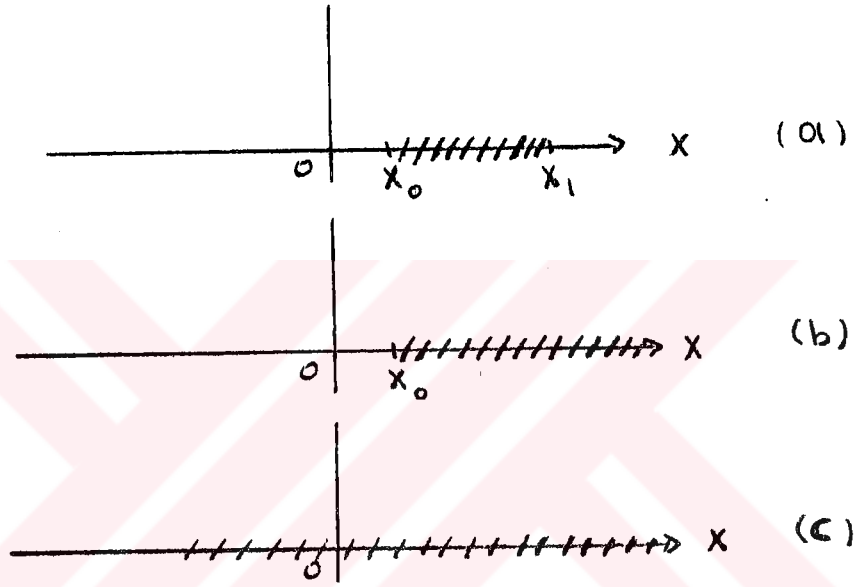
$$\vec{r} = x \vec{i} + y \vec{j} + z \vec{k} \quad (2.16)$$

$$\nabla = \vec{i} \frac{d}{dx} + \vec{j} \frac{d}{dy} + \vec{k} \frac{d}{dz} \quad (2.17)$$

$$\nabla^2 = \frac{d^2}{dx^2} + \frac{d^2}{dy^2} + \frac{d^2}{dz^2} \quad (2.18)$$

eşitliklerinin de değerlendirilip difüzyon olayını incelemek mümkündür. Silindirik geometriye sahip ortamlarda r, ϕ, z silindirik koordinatlar küresel geometriye sahip ortamlarda r, θ, ϕ küresel koordinatları kullanılarak difüzyon denklemleri çözülür.

Bir ortamdaki difüzyon olayının incelenmesinde, bir boyutlu denklem ve çözümler kullanılarak işlemler basitleştirilir. Şekil 2.1 de bir boyutlu problemler için koordinatlar belirtilmiştir.



Şekil: 2.1 Bir boyutlu problemler için koordinatlar :

(a) sonlu ; (b) yarı sonlu ; (c) sonsuz

Maddeden kesilen bir düzlem diliminde difüzyon ; sonlu, $x_0 \leq x \leq x_1$ aralığında, yarı sonlu, $x_0 \leq x < \infty$ aralığında veya sonsuz $-\infty < x < \infty$ aralığında, karteziyen koordinatta incelenebilir. Silindirik yapıdaki bir maddeden silindir şeklinde çıkartılan parçada difüzyon silindirik koordinatta, bir küre geometrisine sahip maddeden alınan küre şeklindeki bölümde ki difüzyon küresel koordinatta incelenebilir.

2.2.1 Fick'in Birinci Difüzyon Denkleminin Çözümü

Tek fazlı bir metal alaşımı erime sıcaklığına yakın derecelere kadar ısıtılıp soğumaya terk edilirse , alaşım elementleri konsantrasyon gradyanı azalacak şekilde net akışa sahip olacaklardır. Eğer ısıtılma süresi yeterince uzun tutulursa bu metal alaşımı homojen olacak ve elementlerin net akışı duracaktır. Bu tür işlemlerde ,akış ,konsantrasyon gradyanı ile aynı düzlemde orantılı olacaktır. Örneğin x ekseninde yaygın bir elementin akışı : 2.6 denklemlerle belirtilen Fick'in 1. yasası ,

$$J_i = - D_i \left(\frac{dc_i}{dx} \right) + \quad (2.19)$$

şeklinde kullanılarak incelenebilir. Deneysel gözlemlerde , $J \rightarrow 0$, $dc/dx \rightarrow 0$ durumunda örnek kütlenin homojen hale geldiği görülmektedir.(2.19) eşitliğinde D 'nin büyüklüğü ,J ve dc/dx 'den bağımsızdır. Bu durum ,ohm yasasındaki ,iletkenin direncinin alım ve voltajdan bağımsız oluşu veya fourier in $q = -K \nabla T$ denklemindeki ,K ısı iletkenlik katsayısının ısı akışı ve sıcaklık gradyanından bağımsız oluşuna benzemektedir. Kütle difüzyon denkleminde J ; Mt^{-2} , D ; $L^2 t^{-1}$, c ; Mt^{-3} , x ; L boyutlarında alınarak çözüme gidilmesi gerekmektedir.Kesit alanı A olan bir düzleme t sürede yaygın kütlesi ; $dc/dt=0$, $J = -D.(dc/dx) = \text{sabit}$ koşulunda gerçekleşen kararlı difüzyon durumunda ,

$$dm = - D . A . dc/dx . dt \quad (2.20)$$

eşitliğinin çözümünden

$$m = - D . A . \Delta c / \Delta x . t \quad (2.21)$$

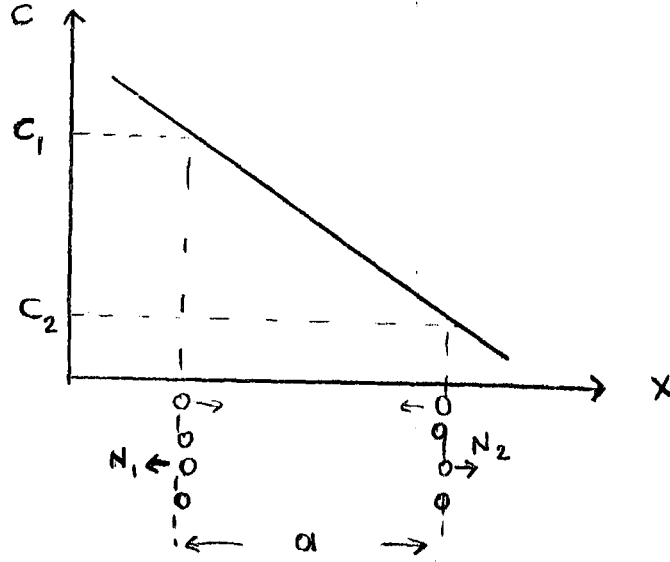
formülü ile bulunur.

Difüzyon denkleminde önemli bir faktör olan D difüzyon katsayısı Arrhenius'un

$$D = D_0 e^{-Q/RT} \quad (2.22)$$

eşitliğinden bulunabilir. Burada ; D_0 ,Frekans faktörü , Q aktivasyon enerjisi , R universal gaz sabiti , T difüzyon ortamının sıcaklığıdır. Bu eşitlikte D_0 ,Q ,R difüzyon ortamının sıcaklığına ,bağılı değildir. Q birimi kalori/mol.gram ,D , D_0 birimleri cm^2 /saniye , $R=1,987$ kalori/mol.gram K olarak alınır.

Ficks'in birinci difüzyon denkleminin kararlı difüzyon olayında uygulandığı gözönünde tutularak ,gazların metallere difüzyonunda $dc/dx = \Delta c / \Delta x = \text{sabit}$ durumunda $C = f(x)$ graf iği şekil (2.2)'deki gibi olacaktır.



şekil 2.2 Gazların metallere kararlı difüzyonu durumunda konsantrasyonun uzaklıkla değişimi (C N yayınan atomlar)

Burada ,yayınan atomların x eksenı yönünde paralel atomik düzlemlerde hareket ettikleri ,difüzyon yol uzunluğunun a, atomların ortalama frekansının r olduğu var sayılmıştır. Birim hacimdeki yayınan atomların sayısı $c_1 = N_1/a$, $c_2 = N_2/a$ atomların r frekansla ,birinci ve ikinci bölgelere atlamaları olasılığı $N_1 r/2$, $N_2 r/2$ olmak üzere ,

$$J = \frac{1}{2} (N_1 - N_2) r = \frac{a}{2} (c_2 - c_1) r \quad (2.23)$$

$$\frac{dc}{dx} = (c_2 - c_1)/a$$

eşitliğini kullanarak

$$J = - \frac{1}{2} a^2 r \frac{dc}{dx} = - D \frac{dc}{dx} \quad (2.24)$$

ile yayınan atomların net akısı bulunur. Örneğin ,Alüminyum alaşımlarının oksidasyonunda yüzeye yayınan Oksijenin Alüminyum atomları veya yüzeydeki diğer element atomları ile oluşturduğu metal - oksit tabakasının kalınlığının artışı

$$\frac{dx}{dt} = k \cdot J \quad (2.25)$$

$$J = - D \frac{\Delta c}{x} \quad (2.26)$$

$$\frac{dx}{dt} = - k.D \frac{\Delta c}{x} \quad (2.27)$$

bağıntılarından

$$x^2 = - K.D.\Delta c.t \quad (2.28)$$

olarak bulunur. Yukarıdaki eşitliklerde K orantı sabiti, x oksit kalınlığıdır. Alüminyum alaşımı yüzeyinde erime sıcaklığına kadar derecelerde oluşturulabilen ince Al_2O_3 tabakası, difüzyon katsayısının küçük oluyundan dolayı alaşımın daha fazla oksitlenmesine engel olur.

Genelde, metalik katı ortamda difüzyon olayında, atomların x ekseninde net akısı; (2.19) basit diferansiyel denklemin çözümünden, elde edilen

$$J_k = - D \frac{(c_k - c_{k-1})}{(x_k - x_{k-1})} \quad (2.29)$$

$$K = 1, \dots, n$$

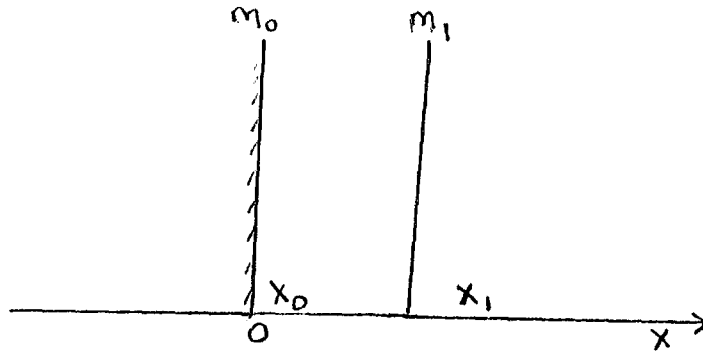
formülü ile, yayılan kütle ise

$$\frac{1}{A} \frac{dm_k}{dt_k} = J_k \quad (2.30.a)$$

$$m_k - m_{k-1} = J_k A (t_k - t_{k-1}) \quad (2.30.b)$$

$$K = 1, \dots, n$$

bağıntılarından bulunur. Örneğin, bir Alüminyum alaşımı yüzeyindeki metalin yayınımı, şekil(2.3)'de belirtilen sınır koşullarında



şekil (2.3) Kutle difüzyonu ($x_0 < x < x_1$ aralığında)

(2.29) formülünde , $k=1$ için

$$J_1 = - D_1 \frac{c_1 - c_0}{x_1 - x_0} \quad (2.30)$$

$$\begin{aligned} x = x_0 & \quad c = c_0 \\ x = x_1 & \quad c = c_1 \end{aligned}$$

(2.30.b) formülünde $k=1$ için

$$m_1 - m_0 = J_1 A (t_1 - t_0) \quad (2.31)$$

olarak bulunur. Fick's in birinci yasası gereğince kararlı bir difüzyon olayı için , t süresince D , dc/dx ve J değerlerinin sabit kalması gerekir. Difüzyon ortamının sıcaklığının artması D değerini artıracığından , t süresince sıcaklık sabit tutulmalıdır. Bu sabit sıcaklıkta ,yayınan maddenin V hacimli difüzyon ortamına c konsantrasyonunda , m gram kadar yayıldığı kabul edilerek ,

$$c = \frac{m}{V} = \frac{m}{Ax} \quad (2.32)$$

değerini ,(2.30) ve (2.31) formüllerinde kullanarak ,

$$m = D \frac{m}{x^2} t \quad (2.33)$$

eşitliği saptanır. Buradan , t süreli difüzyon olayında ;difüzyon katsayısını ,difüzyon yol uzunluğunu veren

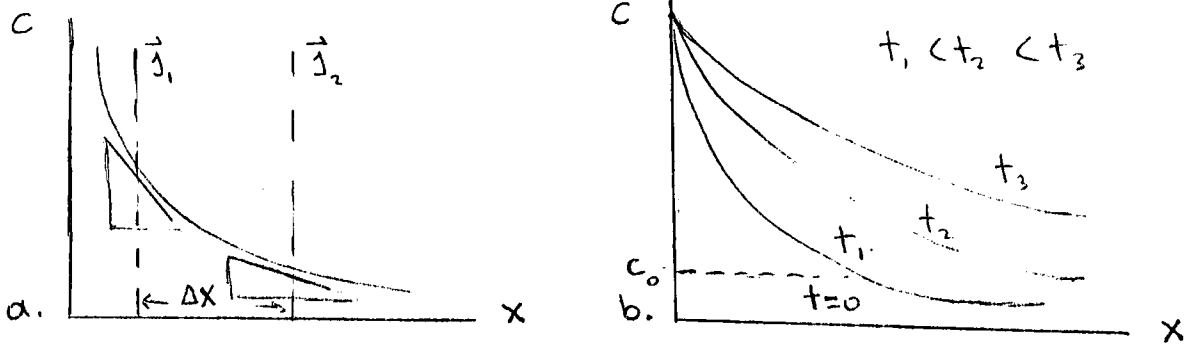
$$x^2 = D_T t \quad (2.34)$$

formülü elde edilir.

(2.34) formülü kararlı difüzyon olayında kullanıldığı gibi ,kararsız difüzyon olayında da kabaca yararlanılabilen bir formül olarak kullanılmaktadır.

2.2.2 Fick'in İkinci Difüzyon Denkleminin Çözümü

Difüzyon ortamının homojen olmaması ,sıcaklığın değişken olması durumunda difüzyon gücü (difüzyon katsayısı) ve yayılan atomların ortamdaki konsantrasyonu zaman ve yerebağılı olarak ,şekil (2.3)'de belirtildiği gibi değişir. Bu durumda ,kararlı difüzyonda geçerli olan Fick'in (2.6) denklemi ile belirtilen birinci yasası yetersiz kalır ,ancak ikinci Fick yasasını ifade eden (2.7) denkleminin çözümü ile bu kararsız difüzyon olayı incelenebilir.



şekil 2.3 Kararsız difüzyon

a- Düzgün olmayan konsantrasyon gradyanı

b- Yarı sonsuz katıda konsantrasyon gradyanının zamanla değişimi

Bir metal ortamında ,birbirinden x uzaklıkta iki kesitte , J_1 ve J_2 atom akısı sonucunda şekil (2.3) de görülebileceği gibi ,konsantrasyonun zamanla değişimi ,

$$\frac{dc}{dt} = \frac{J_1 - J_2}{\Delta x} \quad \frac{\text{atom}}{\text{cm}^3/\text{saniye}} \quad (2.35)$$

eşitliği ile belirtilebilir. Eğer Δx çok küçük alınırsa ,(2.35) eşitliği

$$\begin{aligned} \frac{dc}{dt} &= - \frac{J(x+\Delta x) - J(x)}{\Delta x} = \frac{d}{dx} (-J) \\ &= \frac{d}{dx} \left(D \frac{dc}{dx} \right) \end{aligned} \quad (2.36)$$

şekline indirgenebilir. Böylece (2.7) denklemi $g(x,t)=0$ olarak

$$\frac{dc(x,t)}{dt} = \frac{d}{dx} \left[D \frac{dc(x,t)}{dx} \right] \quad (2.37)$$

biçiminde düzenlenip ,c'nin x,t ile değişimi ,D nin sıcaklığa bağlı olarak x,t ile değişimi koşullarına göre çözümlere kararlı difüzyon olayı incelenebilir.

2.2.2.1 Difüzyon Katsayısının Sabit Durumunda Çözüm

Eğer D konuma bağlı değilse (sabit ise) (2.37) denklemi

$$\frac{dc(x,t)}{dt} = \frac{d}{dx} D \left(\frac{dc}{dx} \right) = D \nabla^2 c \quad (2.38)$$

olarak yazılabilir. Kararlı difüzyon durumunda $dc/dt=0$ olduğundan

$$D \nabla^2 c = 0 \quad (2.39)$$

alınarak ,karteziyen koordinatlarda

$$D \frac{d^2 c}{dx^2} = 0 \quad (2.40)$$

silindirik koordinatlarda ,

$$D \left(\frac{d^2 c}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dc}{dr} \right) = 0 \quad (2.41)$$

küresel koordinatlarda ,

$$D \left(\frac{d^2 c}{dr^2} + \frac{2}{r} \frac{dc}{dr} \right) = 0 \quad (2.42)$$

yazılarak bir boyutlu çözümlere gidilir.[4] İki ve üç boyutlu çözümler daha karmaşık çözümler içerir.[5] Difüzyon katsayısının sabit olduğu durumda (2.40) denklemi

$$\frac{d}{dx} \left(D \frac{dc}{dx} \right) = 0 \quad ; \quad D \frac{dc}{dx} = \text{sabit} \quad (2.43)$$

şeklinde olduğundan bu denklemin çözümleri ,bölüm 2.2.1'de açıklanan kararlı difüzyon denklem çözümleri gibi olacaktır. Eğer ,c konumun ve zamanın bir fonksiyonu ise ve D konuma göre değişmiyorsa (2.38) diferansiyel denklemi ;

$$\frac{dc(x,t)}{dt} = D \frac{d^2 c}{dx^2} \quad (2.44)$$

$$T \text{ } ^\circ K \text{ de } D(x)=\text{sabit}$$

biçiminde yazılıp ,değişkenlerin ayrılması yöntemini kullanarak ,

$$c(x,t) = X(x) T(t) \quad (2.45)$$

(2.45) dönüşümünü (2.44)'de işleme sokup ,

$$\frac{d(X,T)}{dt} = D \frac{d^2(X,T)}{dx^2}$$

$$\frac{1}{TD} \frac{dT}{dt} = \frac{1}{x} \frac{d^2 x}{dx^2} \quad (2.46)$$

durumuna dönüştürülür. Burada X ve T nin birbirinden bağımsız değişken olması nedeniyle aynı k değerine eşit olacağı göz önüne alınıp denklem ;çözüldüğünde ; $k>0, k=0$ durumlarının çözüm vermediği $k<0$ için çözümün $k=-\alpha^2$ gibi bir reel değer için gerçekleştiği görüldüğünden ,uygun koşulda (2.45) denkleminin

$$T(t) = m \exp(-\lambda^2 Dt) \quad (2.47)$$

$$X(x) = A' \sin \lambda x + B' \cos \lambda x \quad (2.48)$$

çözümlerinin ,(2.45)'de yerine konmasıyla

$$c(x,t) = e^{-\frac{\lambda^2}{D}t} (A \sin \lambda x + B \cos \lambda x) \exp(-\lambda Dt) \quad (2.49)$$

elde edilir. Fick'in ikinci difüzyon denkleminin çözümünün bu aşaması x, t, D faktörlerine ve sınır koşullarına göre ,ele alınarak koşullara uygun çözümlere ulaşılır. Metallerde difüzyon olayının analizinde genellikle üzerine çok ince bir madde konulan yarı sonsuz metal parçalar veya birbirine dokundurulmuş yarı sonlu metal parçalar kullanılır. Yayılan madde ,radyoaktif olan veya olmayan bir metal olabileceği gibi bir alaşımdan diğerine yayılma şeklinde de olabilir. Metal kaplamada difüzyon ;Üzeri çok ince bir radyoaktif olmayan veya radyoaktif olan metal ile kaplanmış yarı sonlu bir alaşım kütle sine yayılan elementlerin kütle konsantrasyonu veya radyoaktif konsantrasyonu ,(2.49) bağıntısının çözümünden ;yayın metal ortamının yoğunluğunun homojen olması ve t sürede $T^{\circ}K$ sıcaklıkta yayılan elementin ,D difüzyon gütü ile yayılması durumunda , $0 \leq x < \infty, 0 \leq t < \infty$ sınır koşulunda ,

$$c(x,t) = \frac{S}{\sqrt{\pi Dt}} \exp\left(-\frac{x^2}{4Dt}\right) \quad (2.50)$$

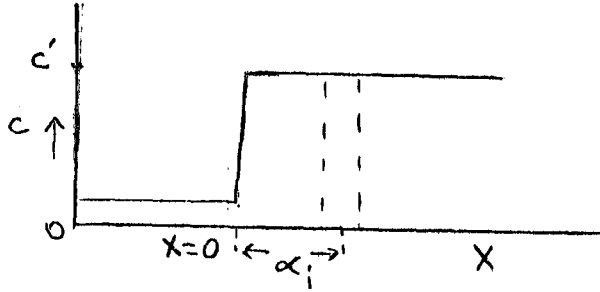
olarak bulunur.

Burada ;S , $t=0$ anında $x<0$ bölgesinde bulunan yayılan elementin kütle miktarı veya toplam radyoaktivite miktarı , $c(x,t), 0 \leq t < \infty, 0 \leq x < \infty$ bölgesinde yayılan elementin kütle konsantrasyonu veya radyoaktif atomların konsantrasyonudur.

Yarı-sonsuz Metal P arçalarında Difüzyon: İki metal parçası yüzeyleri birbirine dokunacak şekilde ısıtılıp işlem yapıldığında ,birinden diğerine yayılan kütle konsantrasyonu aşağıdaki şekilde belirtilen sınır koşullarında (2.49) bağıntısının ,çözümünden ,

$$c(x,t) \sim \frac{c'}{2\sqrt{\pi Dt}} \sum_{i=1}^n \Delta \alpha_i \exp\left[-\frac{(x-\alpha_i)^2}{4Dt}\right] \quad (2.51)$$

elde edilir.



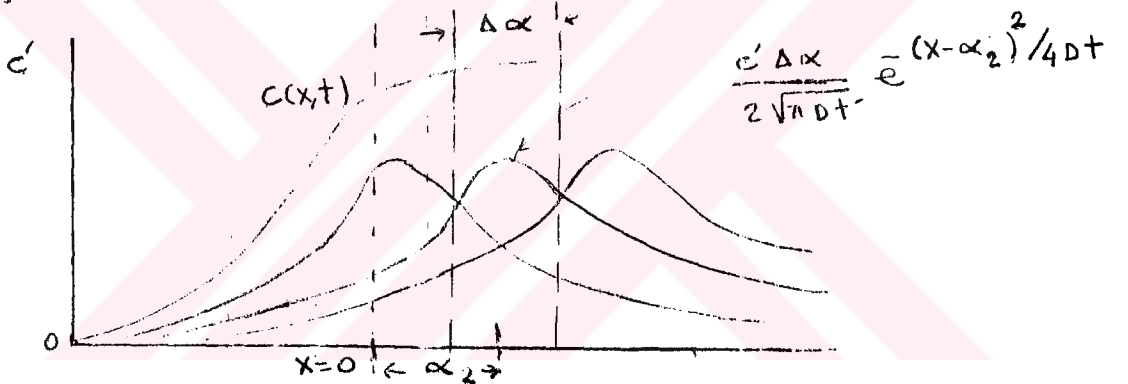
$t=0$ 'da $x < 0$ için $c=0$,
 $t=0$ 'da $x > 0$ için $c=c'$

şekil : 2.4 Yarı sonsuz metal parçalarında konsantrasyon dağılımı

Burada $\Delta\alpha$, difüzyon bölgesinde ($x > 0$) n sayıda kesitten herbirinin kalınlığıdır. Eğer başlangıçtaki kesit $c'\Delta\alpha$ kadar yayınan maddeye sahip ve yayın maddeden ayrı ise difüzyon (2.50) formülünde belirtildiği biçimde incelenebilecektir. Bütün dilimler birbirine bitişikse, α_1 , i'inci kesitin merkezinden $x=0$ a olan uzaklık olarak alınıp (2.51) formülündeki durum oluşacaktır. Limit de $n \rightarrow \infty$ ve $\Delta\alpha_1 \rightarrow 0$ olacağından şekil (2.5)'de belirtilen eksponansiyel konsantrasyon dağılımı (2.51) bağıntısından

$$c(x,t) = \frac{c'}{2\sqrt{\pi Dt}} \int_0^{\infty} \exp\left[-\frac{(x-\alpha)^2}{4Dt}\right] d\alpha \quad (2.52)$$

olarak yazılır.



şekil: 3.5 $\Delta\alpha$ kalınlığında kesitlerin herbirinden yayınan kütlelerin konsantrasyonun eksponansiyel toplamı

(2.52) eşitliği $(x-\alpha)/2\sqrt{Dt} = \eta$ dönüşümü yapılarak

$$c(x,t) = \frac{c'}{\sqrt{\pi}} \int_{-\infty}^{x/2\sqrt{Dt}} \exp(-\eta^2) d\eta \quad (2.53)$$

şeklinde yazılabilir. Bu integralde $2\sqrt{Dt}$ yayınma mesafesi sistemin uzaklığına göre çok küçüktür. integralin çözümü, basit tarzda yapılamaz, ancak hata fonksiyonu olarak bilinen $\text{erf}(z)$ 'nin

$$\text{erf}(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^z \exp(-\eta^2) d\eta \quad (2.54)$$

çözümünden yararlanılarak, bu fonksiyonun tablo (2.1) de

belirtilen değerleri kullanılmak suretiyle (2.53) integrali ęerilur.

z	erf(z)	z	erf(z)
0	0	0.85	0.7707
0.025	0.0282	0.90	0.7970
0.05	0.0564	0.95	0.8209
0.10	0.1125	1.0	0.8427
0.15	0.1680	1.1	0.8802
0.20	0.2227	1.2	0.9103
0.25	0.2753	1.3	0.9340
0.30	0.3286	1.4	0.9523
0.35	0.3794	1.5	0.9661
0.40	0.4284	1.6	0.9763
0.45	0.4755	1.7	0.9833
0.50	0.5205	1.8	0.9891
0.55	0.5633	1.9	0.9928
0.60	0.6039	2.0	0.9953
0.65	0.6420	2.2	0.9981
0.70	0.6778	2.4	0.9993
0.75	0.7112	2.6	0.9998
0.80	0.7421	2.8	0.9999

tablo 2.1: hata fonksiyonu

Erf(z) integrali $\text{erf}(\infty)=1$ ve $\text{erf}(-z)=-\text{erf}(z)$ olduğu g      ne alınarak (2.53) eşitliği

$$c(x,t) = \frac{c'}{2} \left[1 + \text{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right) \right] \quad (2.55)$$

olarak elde edilir. Burada c/c' oranının her değeri $z = x / 2\sqrt{Dt}$ ile bağlantılıdır. Bu nedenle $z=1$ iken $x=2\sqrt{Dt}$ dir. Konsantrasyonun değişimi $x=0$ da $z=0$ için $c=c'/2$ olması d    nda $\sqrt{Dt}$ ile orantılıdır.

Sonsuz Metal Sistemlerinde Difüzyon: Yarı sonsuz bir metal parçası yüzeyinde $x=0$ $t>0$ koşulunda $c=c''$ konsantrasyonunda yayınan metal varsa $x \gg 2\sqrt{Dt}$ durumunda $c=0$ olacak bir sonsuz difüzyon metal difüzyon sistemi durumu ortaya     maktadır. (2.55) eşitliği, konsantrasyonun

$$\begin{aligned} t>0 \text{ da } x=0 \text{ için } c &= \frac{c'}{2} \\ t=0 \text{ da } x>0 \text{ için } c &= c' \end{aligned}$$

olacak şekilde değiştiğini göstermiş olmaktadır. Eğer yüzey konsantrasyonu $t>0$ için $c'/2$ yerine $c=0$ da tutulursa (2.55) form  lu ,

$$c(x,t)=c' \text{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right) \quad (2.56)$$

şekline dönüşecektir. $t^2 O$ için $x < 0$ da c'' konsantrasyonunda serbest bir metal parçadan yayın metal ortamına yayınım denklemi (2.55) formülüne eşdeğer olacaktır. $x > 0$ bölgesinde $\text{erfc}(-x) = -\text{erfc}(x)$ olarak yayınan metalin ortamdaki konsantrasyonu

$$c(x,t) = c'' \left[1 - \text{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right) \right] \quad (2.57)$$

formülünden bulunabilir. Bu formülün incelenmesinden görülmü ki $x=0$ için $c=c''$ ve $x \gg 2\sqrt{Dt}$ için $c=0$ dir. (2.55) , (2.56) , (2.57) denklemlerinde

$$\begin{aligned} t=0 \text{ da } x > 0 \text{ için } c &= c_0 \\ t=0 \text{ da } x < 0 \text{ için } c &= c'' \end{aligned}$$

sınır koşullarında konsantrasyon formülü biraz değişerek

$$c(x,t) - c_0 = \frac{c' - c_0}{2} \left[1 - \text{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right) \right] \quad (2.58)$$

şekline dönüşür.

2.2.2.2 Difüzyon Katsayısının Değişken Olması Durumunda Çözüm

Sıcaklık zamanla değişirse difüzyon gücü (2.22) eşitliği ile belirtildiği gibi exponansiyel olarak değişir. Bundan önceki bölümlerde sıcaklığın difüzyon süresince sabit olduğu kabul edilerek Fick denklemleri analiz edilmiştir. Yayınma ortamının homojen olmaması veya sıcaklığın zamanla değişmesi durumunda ,difüzyon katsayısı x ve t nin fonksiyonu olacaktır. Bu nedenle $D=D(x)$ durumunda (2.37) eşitliği

$$\frac{dc}{dt} = \frac{d}{dx} \left(D \frac{dc}{dx} \right) = \frac{dD}{dx} \frac{dc}{dx} + D \frac{d^2c}{dx^2} \quad (2.59)$$

biçiminde yazılabilir. dD/dx terimi nedeniyle homojen olmayan bu denklemin çözümü ,boltzmann-matono[6] yöntemini kullanarak , $\lambda = x/t^{1/2}$ dönüşümü ile x, t değişkenlerini tek değişkene çevirmek suretiyle gerçekleştirilebilir. Difüzyon gücünün x değişkenine bağlı olması bir değişle yayınan maddenin konsantrasyonunun değişimi olduğu gözönüne alınarak $D=D(c)$ değeri ;c sadece λ 'nın fonksiyonu olmak üzere (2.59) denklemini aşağıdaki şekilde homojen denklem haline getirip gözörök bulunabilecektir.

$$\frac{dc}{dt} = \frac{dc}{d\lambda} \frac{d\lambda}{dt} = - \frac{1}{2} \frac{x}{t^{3/2}} \frac{dc}{d\lambda}$$

ve

$$\frac{dc}{dx} = \frac{dc}{d\lambda} \frac{d\lambda}{dx} = \frac{1}{t^{1/2}} \frac{dc}{d\lambda}$$

dönüşümlerini yapıp (2.59) denkleminin birinci kısmı ,

$$\begin{aligned}
- \frac{x}{2L^{3/2}} \frac{dc}{d\lambda} &= \frac{d}{dx} \left(\frac{D}{t^{1/2}} \frac{dc}{d\lambda} \right) = \frac{1}{t} \frac{d}{d\lambda} \left(D \frac{dc}{d\lambda} \right) \\
\text{veya} \quad - \frac{\lambda}{2} \frac{dc}{d\lambda} &= \frac{d}{d\lambda} \left(D \frac{dc}{d\lambda} \right) \quad (2.60)
\end{aligned}$$

olarak yazılabilecektir.

Bu denklemler iki sonsuz difüzyon sisteminde ,

$$\begin{aligned}
t=0 \text{ da } x < 0 \text{ için } c=c_0 \\
t=0 \text{ da } x > 0 \text{ için } c=0
\end{aligned}$$

başlangıç koşullarında ele alınırsa $t=0$ da $x=0$ daki süreksizlik dışında , orjinal konsantrasyon uzaklığın bir fonksiyonu olmadığı görülmür. Başlangıç koşulları λ terimi ile ifade edildiğinde

$$\begin{aligned}
\lambda = -\infty \text{ da } c=c_0 \\
\lambda = \infty \text{ da } c=0
\end{aligned}$$

olduğu görülmür. (2.60) denklemi sadece toplam diferansiyel içerdiğinden her iki yanından $1/d\lambda$ 'yı silip , $c=c'$ ve $c=0$ arasında integral işlemi yapılırsa

$$- \frac{1}{2} \int_{c=0}^{c=c'} \lambda dc = \left[D \frac{dc}{d\lambda} \right]_{c=0}^{c=c'}$$

yazılabilir. Burada c' , $0 < c' < c_0$ aralığında konsantrasyonu göstermektedir. $c(x)$ hakkındaki bilgiler daima belirli süreler için verildiğinden zamanı sabit alarak , λ ifadesinde bu durum gözönünde tutulup

$$- \frac{1}{2} \int_0^{c'} x dc = Dt \left[\frac{dc}{dx} \right]_{c=0}^{c=c'} = Dt \left(\frac{dc}{dx} \right)_{c=c'} \quad (2.61)$$

elde edilir. Sonsuz sistemde $c=0$ da $\frac{dc}{dx}=0$, $c=c_0$ da $\frac{dc}{dx}=0$ olarak

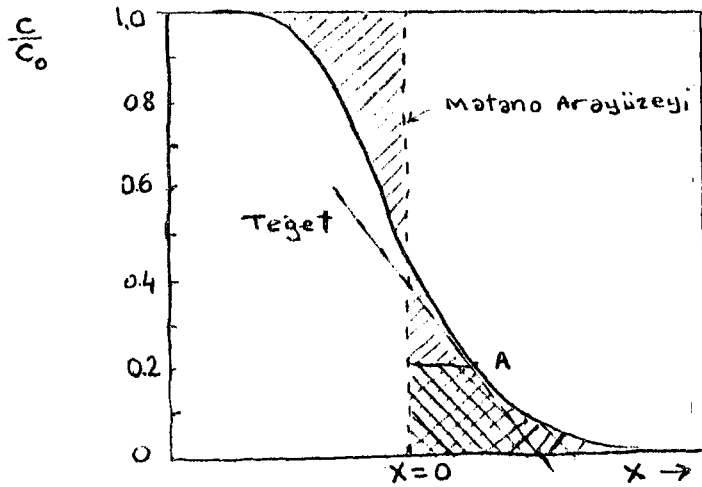
$$\int_0^{c_0} x dc = 0 \quad (2.62)$$

yazılabilir. Bu belirlemelere göre , x , $D(c')$, değerleri

$$D(c') = - \frac{1}{2t} \left(\frac{dx}{dc} \right)_{c'} \int_0^{c'} x dc \quad (2.63)$$

bağıntısından bulunur.

$D(c)$ difüzyon katsayısının (2.63) bağıntısından bulunuşunda $C(x)$ diferansiyelinden ve deneysel sonuçlara göre saptanmış şekil (2.6) de belirtilen Matano arayüzeyi yönteminde yararlanılır.



şekil : 2.6 Penetrasyon eğrisi

İki parçaya ayrılan bir metalin birbirine lehimlenmiş gibi sıkı şekilde dokundurulup birinden diğerine yayınma incelendiğinde $D_1 \approx D_2$ yayınma güçlerinin denk olduğu ve şekilde görüldüğü gibi yayınan atom konsantrasyonunun Matano arayüzeyi ile ayrılan iki bölgede eşit olduğu görülür. Bu durum bir metal yüzeyine kaplanmış örnekten metal içine yayınmada da ,Matano yüzeyini , (2.62) integralinin çözümünden , $x=0$ da belirleyip , $D(c)$ 'nin analizinde değerlendirilir. Şekil (2.6) da , $c=c_0/2$ değerinde , D 'nin değeri çapraz çizgili bölgenin alanının ölçülmesi ve eğriye A noktasında teget olan doğrunun eğiminden bulunur. $D(c)$ 'nin hesaplanmasında hatalar $c/c_0=1$ ve $c/c_0=0$ da en büyüktür. Bu nedenle bu değerlerde (2.62) integrali çok küçük , dx/dc çok büyük olacaktır. Bu çözüm alaşımların bileşik D değerlerinin hesaplanmasında özellikle yaygın olarak kullanılır.

D konumdan bağımsız , ancak zamanla değişiyorsa (2.59) eşitliği

$$\frac{dc}{dx} = D(t) \frac{d^2c}{dx^2} \quad (2.64)$$

şekline dönüşecektir. Bu diferansiyel denklemin çözümü D 'nin sabit halindeki yöntemlerle olacak , ancak , zamana bağlı difüzyon katsayısının bulunmasında

$$\bar{D}t = \int_0^t D(t) dt \quad (2.65)$$

integralinin çözümünden , t süresince sabit tutulan sıcaklık derecelerinde $\bar{D}t$ değerlerinin ortalaması bulunabilecektir. Buna göre , $T_1 = T_2 = \dots = T_n$ sıcaklıklarında ,

$$\bar{D}t = \bar{D}t_1 + \bar{D}t_2 + \dots + \bar{D}t_n \quad (2.66.a)$$

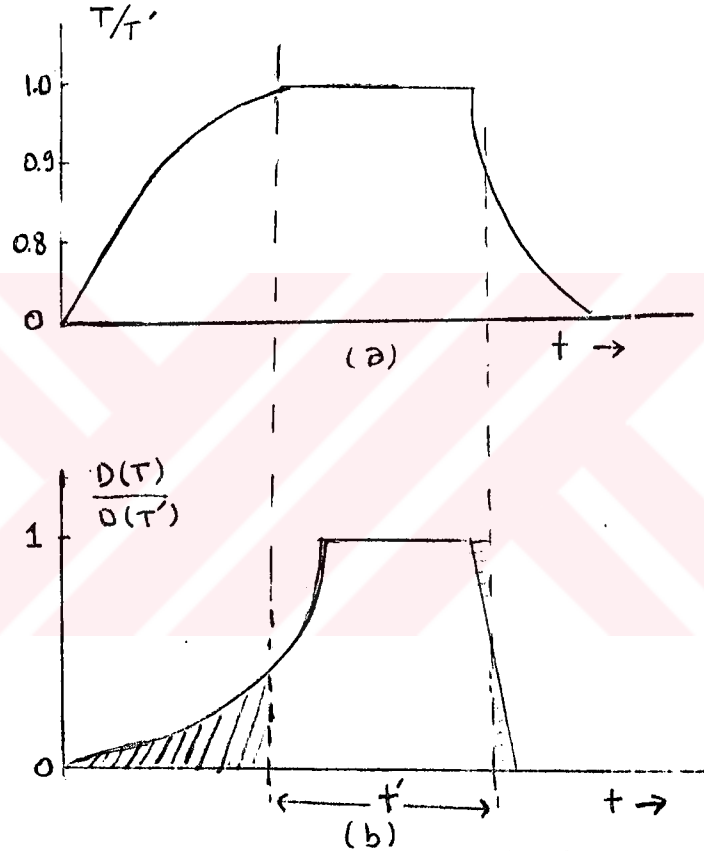
$$\bar{D}t = \bar{D}t_i \quad (2.66.b)$$

$$\bar{D} = \frac{\int_0^t D dt}{t} \quad (2.66.c)$$

eşitliklerinden hareketle toplam t süresindeki ortalama difüzyon gücü $\bar{D}$ bulunabilmektedir.

3 - DENEYSEL DİFÜZYON BAĞINTILARI

Deneysel verilerden hareketle [7] ,aynı miktarda difüzyonu gerçekleştiren t zamanı ve T sıcaklığını saptamak için şekil (3.1) de görüldüğü gibi ,karşılıklı olarak zaman-sıcaklık ve difüzyon gücü-zaman dönüşümü yapılarak (2.65) eşitliğinin uygulaması gerçekleştirilebilmektedir.



Şekil : 3.1 a) Difüzyon ortamında sıcaklık-zaman ilişkisi
b) Difüzyon ortamında D-t ilişkisi

Şekil (3.1) de görüleceği gibi T' sıcaklığında t' süresince ,aynı difüzyon evresinde difüzyon gücü değişmemektedir. Bu ilim süresince $0,8 T'$ üzerindeki sıcaklığın toplam difüzyona katkısı olmaktadır. DCTD değeri (2.22) eşitliği ile belirlenen Q ve T değerlerinede bağlıdır. Q ,genelde metalin erime sıcaklığı ile doğru orantılı değerler alır. Difüzyon ortamının sıcaklığı %10 kadar artırıldığında difüzyon gücü on kat artar. T_m erime sıcaklığına yakın sıcaklıklara kadar ısıtılıp akkor hale getirilir ve daha sonra soğutulan metalde , Q değeri ,

$$Q = A T_m \quad (3.1)$$

eşitliği ile bulunabilir. Burada A bir orantı sabitidir.

Difüzyon ortamının sıcaklığının erime sıcaklığına kadar yükseltilmesi durumunda , (2.22) ve (3.1) eşitliklerinden yazılabilen

$$D = D_0 \exp\left(-\frac{A T_m}{R T}\right) \quad (3.2)$$

eşitliği ile şekil (3.1) de belirtilen T ve D değerlerinin sabit bölgesi belirlenebilir.

Alüminyum alaşımları ve genelde tüm metal ortama bir elementin atomik difüzyonunun analizinde , yukarıdaki bölümlerde , $D (\equiv -J/\nabla c)$ difüzyon ortamının kristallografik yapısından bağımsız , diğer etkenlere bağlı bir sabit olarak kabul edilmiştir. Difüzyon ortamının kristal yapısının yayınmaya etkisi gözönüne alındığında; konsantrasyon gradyanının kristal eksenine göre değişimi ile $\vec{J}$ arasında ,

$$J_x = - D_{11} \frac{dc}{dx} - D_{12} \frac{dc}{dy} - D_{13} \frac{dc}{dz} \quad (3.3)$$

$$J_y = - D_{21} \frac{dc}{dx} - D_{22} \frac{dc}{dy} - D_{23} \frac{dc}{dz} \quad (3.4)$$

$$J_z = - D_{31} \frac{dc}{dx} - D_{32} \frac{dc}{dy} - D_{33} \frac{dc}{dz} \quad (3.5)$$

bağıntılarının olduğu gözlenir [7]. Difüzyon ortamının kubik kristal yapıya sahip olması durumunda , $dc/dx = \alpha \neq 0$ ve $dc/dy = dc/dz = 0$, $dc/dy = \alpha \neq 0$, $dc/dx = dc/dz = 0$ veya $dc/dz = \alpha \neq 0$, $dc/dx = dc/dy = 0$ olacağından $D_{11} = D_{22} = D_{33}$ özel durumu gerçekleşir. Tetragonal kristal yapıli ortamda , $[010]$, $[100]$ eksenleri özdeş $[001]$ eksenleri farklı olduğundan $D_{11} = D_{22} \neq D_{33}$, benzer düşünceyle ve hexagonal kristal de eksen uzunlukları $a = b \neq c$ olduğundan $D_{11} = D_{22} \neq D_{33}$, ortorombik kristal için , $a \neq b \neq c$ olduğundan $D_{11} \neq D_{22} \neq D_{33}$ bağıntıları geçerlilik kazanır. Kubik olmayan kristal yapıda , kristal eksenlerine bağlı olarak difüzyon qucu değişimi pek az ölçülmüş olup bazı metaller için elde edilen değerler aşağıdaki tabloda verilmiştir [7].

metal	kristal yapısı	D_{01}	D_{011}	$\Delta Q_{\perp}$	$\Delta Q_{\parallel}$	$T=0.9 T_m$ $D_{11} / D_{\perp}$
Cd	hcp	0.10	0.05	19.1	18.2	1.20
Mg	hcp	1.50	1.00	32.5	32.2	0.82
Ti	hcp	0.40	0.40	22.6	22.9	0.73
Sn	bct	1.40	8.20	23.3	25.6	0.48
Zn	hcp	0.58	0.13	24.3	21.8	1.07

tablo : 3.1 bazı metaller için D_{11} ve $D_{\perp}$

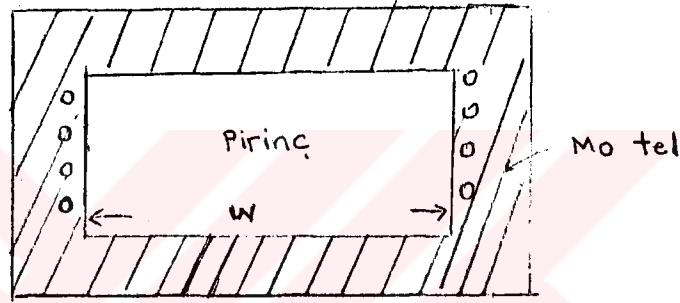
tabloda , D_{11} ve $D_{\perp}$, kristal hücrenin c eksenine paralel ve dik difüzyon katsayısını , Q aktivasyon enerjisini göstermektedir ve D 'nin birimi $\text{cm}^2 \text{s}^{-1}$, Q birimi kcal/mol olarak alınmıştır. Metal kristal eksenleri , iletkenlik ölçümlerinde de kendini göstermekte

,kristal hücresinin c eksenine paralel veya dik durumda iletkenlik farklı değerler almaktadır. Atomik kütle difüzyonu ile elektrik iletkenliği birbirine özdeş olmamakla beraber ,iyonlaşmış atomların difüzyonunu yada yük transportunu belirten ;

$$\sigma = N \cdot q \cdot \mu = q \cdot v \cdot n^2 / RT \cdot \exp(- Q/RT) \quad (3.6)$$

eşitliğinde görüleceği gibi ,aralarında benzerlik vardır. Burada ; N ,q yüklü iyon (safsızlık) katkı yoğunluğunu ,v oda sıcaklığında atılma frekansını , μ iyonik mobilitayı ,a kristal düzlemlerin arasındaki uzaklığı , σ elektriksel iletkenliği göstermektedir. (3.6) eşitliğinde $q \cdot v \cdot a^2 / RT \neq D_0$ olduğu deneysel gözlemlerde belirlenmiştir [8]. Bu durum kütle difüzyon mekanizması ile iyon transport mekanizmasının farklı olmasından ileri gelmektedir.

Metal alaşımlarında ,alaşım elementlerinin difüzyonu Kirkendall ve Smigel Skas tarafından şekil (3.2) de görüldüğü gibi 70-30 pirinç çubuk üzeri ince molibden tel ile sarıldıktan sonra üzeri kalın bir bakır tabakası ile kaplanarak ,ışıl işlem yapılmış her elementin atomlarının aynı koşullarda farklı difüzyon gücüne sahip oldukları saptanmıştır [7]



şekil : 3.2 Kirkendall ve Smigelskas difüzyon deney düzenneği. W iki taraftaki molibden tel arasındaki uzaklığı (çubuk kalınlığı) belirtmektedir.

Yapılan bu gözlemlerde ,molibden telin çıkıştığı ,W çubuk kalınlığının azaldığı saptanmıştır. Pirinç metaldeki her iki elementin difüzyon akısının ,

$$J_1 = -D_1 \frac{dc_1}{dx} \quad J_2 = -D_2 \frac{dc_2}{dx} \quad (3.7)$$

ve konsantrasyonun ,Fittle korunumundan , $c_1 + c_2 =$ sabit olduğu gözönünde tutularak

$$\frac{dc_1}{dx} = - \frac{dc_2}{dx} \quad (3.8)$$

$$J_1 - J_2 = (D_1 - D_2) \frac{dc_2}{dx} \quad (3.9)$$

$$\frac{dw}{dt} = \frac{1}{\rho} (D_1 - D_2) \frac{dc_2}{dx} \quad (3.10)$$

$$\tilde{D} = D_1 N_2 + D_2 N_1 \quad (3.11)$$

$$N_1 = \frac{c_1}{f} \quad N_2 = \frac{c_2}{f} \quad (3.12)$$

bağıntıları yazılabilir. Burada 1 ve 2 indisi bakır ve çinko'yu belirtmektedir. Hacim değişikliğinin olmadığı durum için geçerli olan (3.10) eşitliğinde ; f alaşımin yoğunluğunu , (3.11) de ; $\tilde{D}$ alaşımin difüzyon sabitini , N_1 ve N_2 alaşımdaki elementlerin atomik oranlarını göstermektedir. Bu eşitlikleri kullanarak , yapısında %27 Zn olan piring alaşımında , çinkonun difüzyon gücünün , bakırın difüzyon gücünün yedi katı kadar olduğu görülür. Bu oran , difüzyon ortamının sıcaklığı ve alaşımin kompozisyonuna göre değişir , ancak piring örneğinde , her zaman $D_{Zn} > D_{Cu}$ olarak bulunur. Yakın tarihlere kadar yayımlanan literatürlerdeki verilerden , alüminyum alaşımlarında da yapıdaki elementlerin oranı ve difüzyon koşullarına göre , yayınan atomların difüzyon gücünün değiştiği bilinmektedir [9]. Ancak difüzyonun : ortamdaki elementlerin oranı , atomların sayısı , atomların boyutu , yerleşim düzeni , sıcaklık gibi etkenlere göre çok değişken olması nedeniyle , henüz bütün metal ortamlarında yayınım olayının , deneysel olarak incelenmesi tamamlanmış değildir. Bununla beraber yapılan deneylerden elde edilen sonuçlardan çıkarılan aşağıdaki formüller genelde tüm metallerin difüzyonunun incelenmesinde kullanılarak , uygulamada değerlendirilmektedir.

3.1 Difüzyon Katsayısı ve Faktörleri

Metalik ortamda bir elementin D difüzyon gücü , (2.22) formülünde belirtilen $D = D_0 \exp(-Q/RT)$ eşitliği ile bulunabilir. Bu formülde , D_0 frekans faktörü ile Q aktivasyon enerjisi

$$D_0 = \frac{Qa^2}{Nh} = 1.04.10^{-3} . Qa^2 \quad (3.13)$$

$$Q = -R.T.ln2.D \quad (3.14)$$

bağıntılarından hesaplanır. Burada ; a , kristal sabiti , N ; avogadro sayısı , h ; plank sabitidir. (3.13) formülünde a , Q , kcal/mol biriminde alınır. D_0 , birçok element için , $0.2-0.9 \text{ cm}^2/\text{saniye}$ değerleri arasındadır. (3.14) formülünde Q , cal/mol , R ; cal/mol.derece , T , $^{\circ}\text{K}$, D $\text{cm}^2/\text{saniye}$ biriminde alınır. (3.13) ve (3.14) bağıntıları , saf metallerde (bcc kristal yapılı metaller hariç) self difüzyon ve alaşımlarda difüzyon olayında kullanılabilir. Aynı kimyasal yapıdaki bir metalden , diğerine veya atomun kendi içindeki atomik difüzyonda (self difüzyonda) Q aktivasyon enerjisi ile difüzyon ortamının erime noktası , sıcaklığı , buharlaşma noktaları , elastik modülü gibi değişik fiziksel özellikleri arasında bağıntılar vardır. Katılardaki atomik difüzyonun ve bu bağıntıların atomların bağlanma enerjilerinden kaynaklandığı bilinmektedir. Bu temel bilgilerden hareketle Q self difüzyon enerjisi ile P fiziksel özellikleri arasında

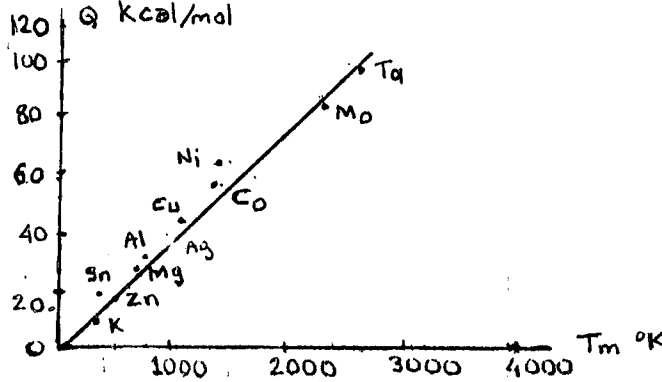
$$Q = A.P \quad \text{veya} \quad Q = B/P \quad (3.15)$$

bağıntıları kurulabilir. Burada A ve B orantı sabitleridir.

Difüzyon aktivasyon enerjisi ile difüzyon ortamının erime noktası ,lineer genişleme katsayısı ,sublimasyon ve sıkışma faktörü arasında (3.15) eşitlikleri ile belirtilen bir ilişki vardır. T_m erime noktası ile Q arasında ki

$$Q=A.T_m \quad (3.16)$$

bağıntısından ve şekil (3.3) de $Q=F.(T_m)$ grafiğinden ,aktivasyon enerjisi ile erime noktası arasında doğru orantılı bir ilişki olduğu anlaşılar.



şekil : 3.3 Erime noktasına bağlı olarak aktivasyon enerjisinin değişimi

(3.16) eşitliğinde A bir orantı sabitidir. Metal ortamların çoğunluğunda A sabitinin ortalama değeri $33,7 \text{ cal/mol}^\circ\text{K}$ dir. Bu nedenle

$$Q=33,7.T_m \quad (3.17)$$

olarak uygulamada genelde kullanılabilir. Ancak fcc kristal yapılı metallerde $A=38 \text{ cal/mol.K}$,bcc kristal yapılı metallerde $A=32,5 \text{ cal/mol.K}$ değerlerini alır. Diğer taraftan Q ile T arasındaki bu bağıntılar Sn ,Ge ,C , γ -u , β -Ti , β -Zr (periyodik cetvelin IV A grubundaki bütün elementler) için pek elverişli sonuç vermez.

Atomik packing kesri ile Q arasında ki

$$Q = \frac{B.T_m}{f^{2/3}} \quad (3.18)$$

bağıntısından ,erime noktası bilinen metalik yapının aktivasyon enerjisi saptanabilir.F packing kesri

$$F = \frac{N_0 \rho}{m} \left(\frac{4\pi}{3} \right) a^3 \quad (3.19)$$

eşitliğinden bulunur.

Self difüzyonla ,erime sıcaklığı arasında (3.13) ve (3.17) bağıntılarından elde edilebilen

$$D = 3,4.10^{-5} .T_m .a^2 .\exp(-17.T_m/T) \quad (3.20)$$

bağıntısı ile difüzyon aktivasyon enerjisi yerine T ve T_m °K sıcaklık ve a °A kristal sabiti kullanılarak D hesaplanabilir.

Self difüzyon aktivasyon enerjisi ile L_f erime gizli ısı ve L_s sublimasyon ısı arasında ,

$$Q=16,5.L_f \quad Q=0,65.L_s \quad (3.21)$$

bağıntıları vardır. Burada erime gizli ısı kcal/mol birimi cinsinden alınır. Q ile sıkışabilirlik arasında

$$Q = B/\chi \quad (3.22)$$

bağıntısı vardır. Formülde B ,bir katsayı χ sıkışabilirlik faktörüdür. Q ile α boyca genleşme ,oda sıcaklığında $Q=700/\alpha$ [kcal/mol] bağıntısı ile ifade edilir ve %10 doğrulukla geçerlidir. Burada α 'nın birimi $\text{ppm}/^\circ\text{C}$ cinsindendir.

3.2 Difüzyon Aktivasyon Enerjisi ve Elastik Modül Bağıntıları

Kristal yapıda ,yerinden ayrılan bir atomun bıraktığı boşluğa diğerinin yerleşmesi şeklinde olan vacancy mekanizmasıyla difüzyonda $Q=A$ (elastik modül) bağıntısı

$$Q = K.E_0.a^3 \quad (3.23)$$

şeklinde yazılabilmektedir. Burada ; E_0 ,elastik sabit , a kristal sabiti , K kristal yapıya bağlı bir sabittir. Deneysel sonuçlardan çıkarılan

$$D_0 = a^2 . \nu . \exp(\lambda \beta . Q/R.T_m) \quad (3.24)$$

$$D_0 = a^2 . \nu . K . \exp(Q/R.T_m) \quad (3.25)$$

bağıntılarında metalik yapıdaki difüzyon olaylarının genelinde kullanılabilir. Bu eşitliklerde ; $K=10^{-6}$ ve $Q/T_m=34$ durumunda $\lambda \beta =0,2$ değerini alır. Birçok metal için $\beta =0,25-0,45$ aralığında $\lambda =0,8$ (fcc kristal yapıda) , $\lambda =0,8$ (bcc kristal yapıda) $\lambda \beta =0,15-0,35$ aralığında değerler saptanmıştır.

3.3 Erime Noktası İle Kristal Yapı Arasındaki Bağıntılar

Self difüzyon aktivasyon enerjisi ,metalin erime noktasına bağımlı olduğu gibi metal atomlarının valansına ve kristal yapısına bağlı özelliklerden de etkilenmektedir. Kristal yapısı , bcc ,fcc ve cph tiplerinde olan metallerde difüzyon gücü ;

$$D = D_0 . \exp(K.T_m/T) \quad (3.26)$$

eşitliği ile bulunabilir. Burada K sabiti K_0 kristal yapı faktörüne ve V efektif valansına $K=K_0+V$ şeklinde bağımlıdır. bcc tip kristalde $K_0=14$, fcc ve cph tip kristallerde $K_0=17$ değerini alır.

Self difüzyon aktivasyon enerjisinin hesaplanmasında kullanılan $Q=\text{sabit}.T_m$ eşitliğinin yerine ,periyodik cetvelin her grubundaki elementler için geçerli olan

$$Q = (K_0+V) . R . T_m \quad (3.27)$$

eşitliği daha yaygın olarak kullanılmaktadır.

(3.27) eşitliğinde , efektif valansı gösteren V :
IV B grubu (Ti ,Zr ,Hf) için 1,5 ;V B grubu (V ,Nb ,Ta) için 3 ,
VI B grubu (Cr ,Mo ,W) için 2,8 ,VII B grubu (Mn ,Fe) için 2,6 ,
diğer geçiş elementleri için 2,5 olarak alınabilmektedir.

3.4 Alaşımlarda Self Difüzyon ve Yabancı Atom Difüzyonu

Yabancı atomların bir metal ortamına yayılımının incelenmesinden ,D ve Q parametreleri arasında ve yabancı atomların valans ve boyut faktörleri arasında genel bir bağıntı kurulamamıştır. Soy metaller içine yabancı atomların yayılımında , yayılan elementin valansı arttıkça ,aktivasyon enerjisinin azaldığı saptanmıştır. Molibdanyum gibi geçiş elementlerinin içine Co ,Nb ,W benzeri yabancı atomların difüzyonunda D ve Q değerleri self difüzyon durumundaki D ve Q değerlerinden büyüktür. Ancak bu durumun atom büyüklükleri ile ilgili genel bir bağıntısı kurulamamıştır.

Geçiş elementleri ve diğer elementlerden oluşan alaşım sistemlerinde ,yabancı atom difüzyonun ve self difüzyonun incelenmesinden Q ve D₀ arasında

$$Q = Q_p[1+a.c] \quad (3.28)$$

$$\ln D_0 = \ln D_{0p} .[1+a.c] \quad (3.29)$$

bağıntılarının kurulabileceği saptanmıştır. Bu bağıntılarda :

Q_p ;saf metal içine yabancı atomlar yayılması durumundaki aktivasyon enerjisini

Q ;A alaşımı içinde B elementinin yayılması durumunda aktivasyon enerjisini

c ;alaşım konsantrasyonunu

a ;sisteme bağlı bir sabiti göstermektedir.

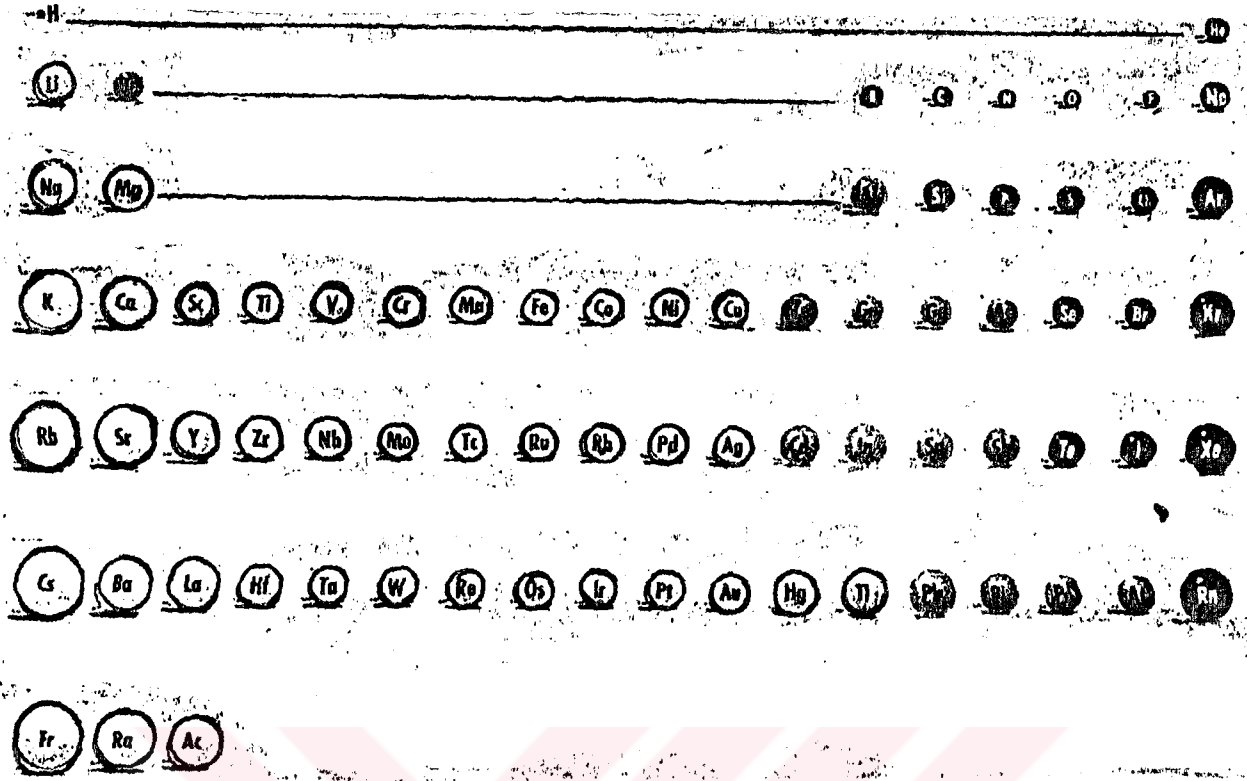
Yayan ve yayılan elementlerin ;atom çapları ,elektronegatif -likleri ,değerlikleri ,kristal yapıları difüzyon da etkili olmakta bu faktörlerin etki derecesi için her element için genel bir bağıntı kurulamamakla birlikte genelde ,deneysel gözlemlerden bazı pratik sonuçlara varılmaktadır [6].

3.4.1 Atomik Büyüklük Faktörü

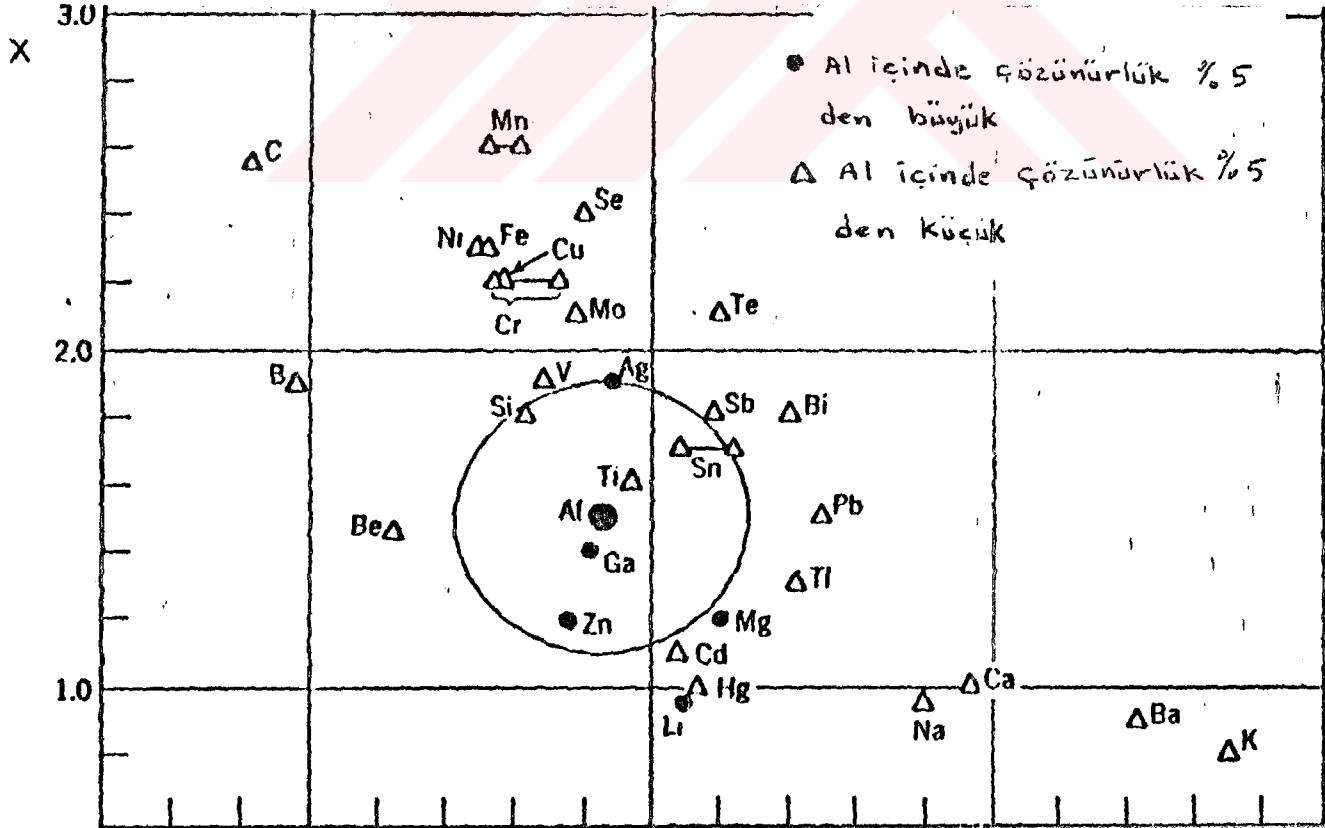
Yayan ve yayılan atomların çapları (yaklaşık olarak kristal sabitleri) arasındaki fark/onbeşden küçükse difüzyon hızı büyük , söz konusu fark/onbeşden büyükse difüzyon hızı küçüktür. Şekil (3.4) de belirtilen x-ışını ve elektron kırınımı deneyi sonuçlarından saptanan elementlerin atom büyüklükleri diğer faktörlerle birlikte etkileşim halinde difüzyon hızını etkilemektedir.

3.4.2 Elektronegativ Faktörü

Elementlerin birbirine kimyasal ilgisinin bir ölçüsü olan elektronegativite faktörü küçüldükçe difüzyon hızı artar. Ancak boyut faktörünün de etkisiyle ,örneğin Alüminyum içinde elementlerin yayılımında şekil (3.5) deki durum ortaya çıkar.



Şekil : 3.4 Elementlerin nötr atomlarının bağıl büyüklükleri



Şekil : 3.5 Alüminyum içinde elementlerin yayılımı [6]

3.4.3 Bağlı Değerlik Faktörü

Yayılan elementin değeriği ,yayan elementden farklı ise ,elektron oranı adı verilen ve difüzyon ortamında atom başına düşen değeriği elektronlarının sayısını gösteren oran değeriği. Kristal yapılar ,elektron oranının azalmasına artmasından daha çok duyarlılık gösterirler. Bu nedenle büyük değeriği olan metal ,küçük değeriği metal içerisinde daha fazla değeriği küçük olan metal ,büyük değeriğe sahip metal ortamında daha az yayılır. Değeriğin de difüzyonu etkilemesi tablo 3.2 de görüldüğü gibi , atomik büyüklük ,elektronegativite faktörleri ile etkileşim durumuna göre olmaktadır.

Tablo : 3.2 Bazı Elementler için Değeriği Elektronları Sayısı ;Elektronegativite ,kovalent yarıçap büyüklükleri [6]

atom	tek bağ kovalent yarıçap r	değeriği elektron- ları n	elektro- negativite x	k
Ag	1.53	1	1.9	0.91
Al	1.26	3	1.5	1.48
C	0.77	4	2.55	2.52
Cd	1.48	2	1.1	1.13
Cu	1.35	1	2.2	0.96
H	0.37	1	2.13	2.17
Mg	1.40	2	1.2	1.16
Mn	1.18	7	2.6	2.60
Mo	1.36	6	2.1	2.09
O	0.73	6	3.45	3.47
P	1.10	5	2.1	2.19
Pb	1.46	4	1.5	1.56
Sn	1.40	4	1.7	1.61
Zn	1.58	4	1.6	1.48

tablo 3.2 de belirtilen r ,n ve x arasındaki ilişkiyi gösteren k faktörü ,

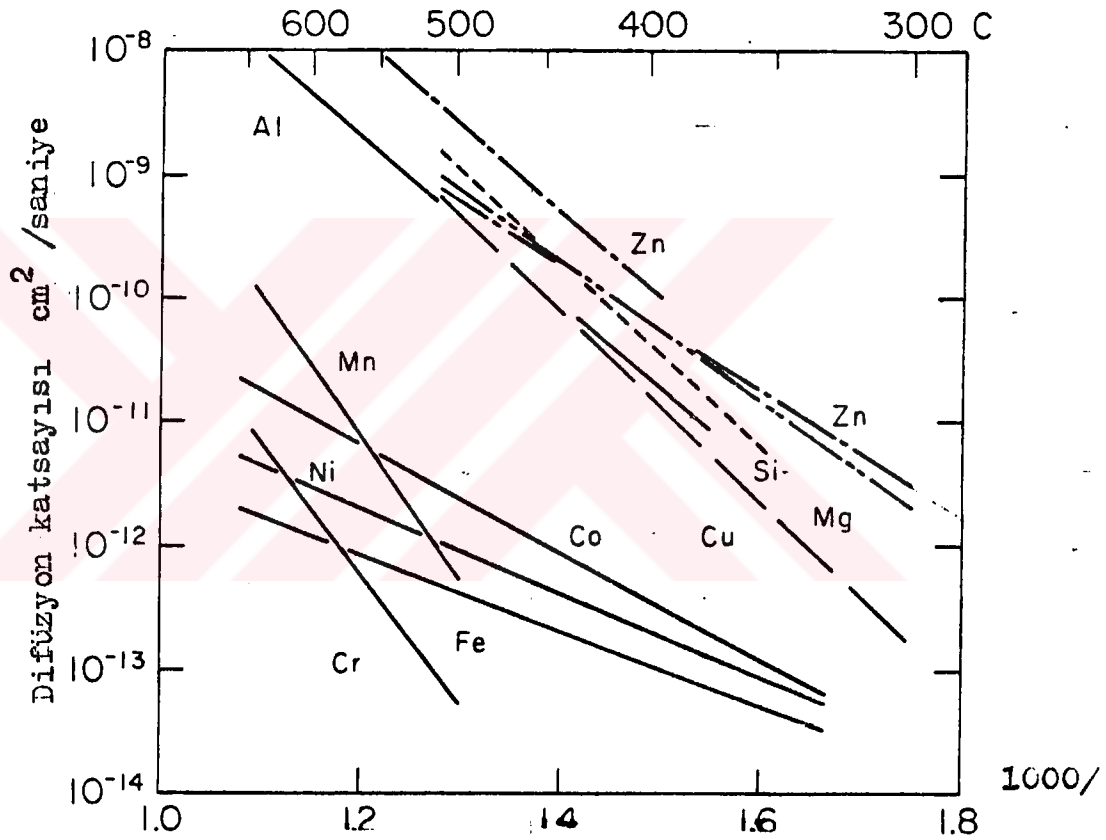
$$k = 0,31 \left(\frac{n+1}{r} \right) + 0,50$$

eşitliği ile saptanır. x elektronegativitenin birimi $\sqrt{eV}$ /bağ sayısı olarak alınır.

3.4.4 Kristal Yapı Faktörü

Aynı tür kristal yapıda olan elementler birbirlerinin ortamına ;farklı tür kristal yapıda olanlara göre daha kolay yayılırlar. Difüzyon ortamında yayılan atomlar yayan atomların kristal yapısını bozarak (değiştirerek) periyodik hücre kuvvetlerini azaltır ,böylece atomları transferi daha kolay olur.

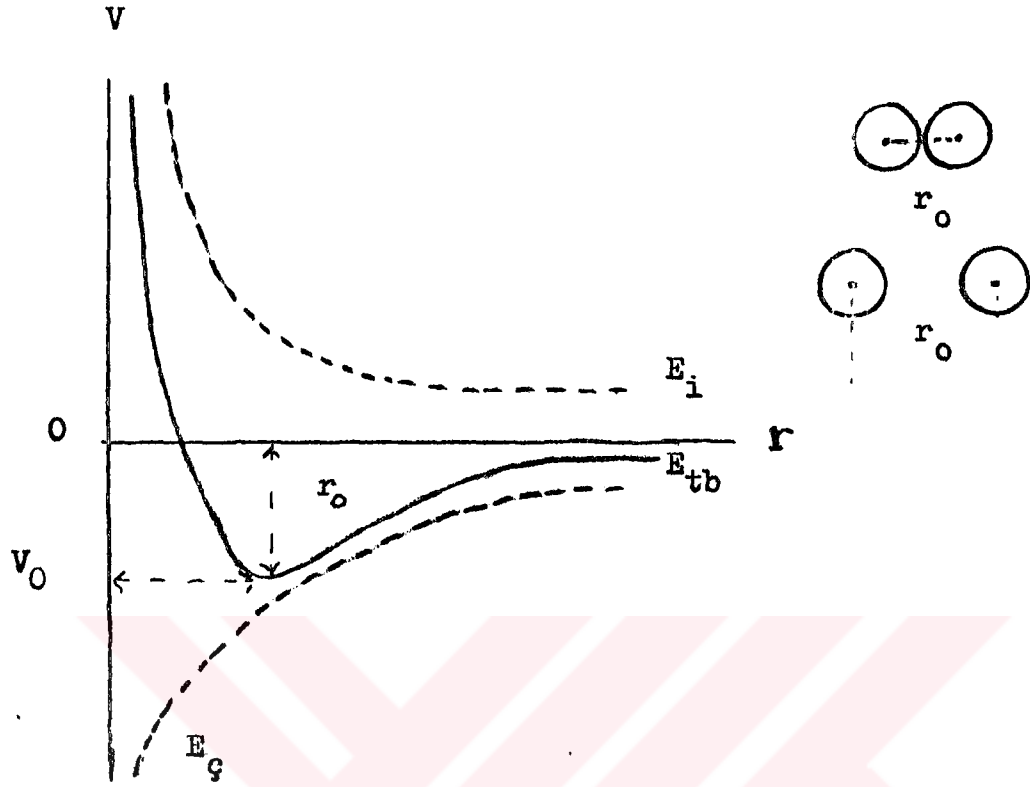
Elementlerin kristal yapıları tablo 3.3 de gösterilmiştir. Bu tablodan görüldüğü gibi ,Alüminyum yüzey merkezli kübik kristal yapıdadır. Bu yapı ,yabancı atomların Alüminyum ortamına çeşitli difüzyon mekanizması ile yayılması ile bir miktar bozunur veya değişir. Alüminyumun erime sıcaklığının üzerindeki sıcaklıklarda , sıvı durumunda ,iken içerisine katılan diğer elementler ile amorf bir karışım halindedir. Soğutularak katılaştırılan bu yapının ,oluşan alaşımın türüne göre yeni bir kristal yapıda olduğu görüldür. Bazı elementlerin Alüminyumda ki difüzyon hızının sıcaklıkla değişimi şekil (3.6) da belirtildiği gibi olduğu bilinmektedir. Yeterli difüzyon süresi sonunda katı durumda Alüminyum içine ,belirli oranda diğer elementler yayılarak , kristal yapısı ve diğer fiziksel özellikleri farklı bir alaşım meydana getirirler.



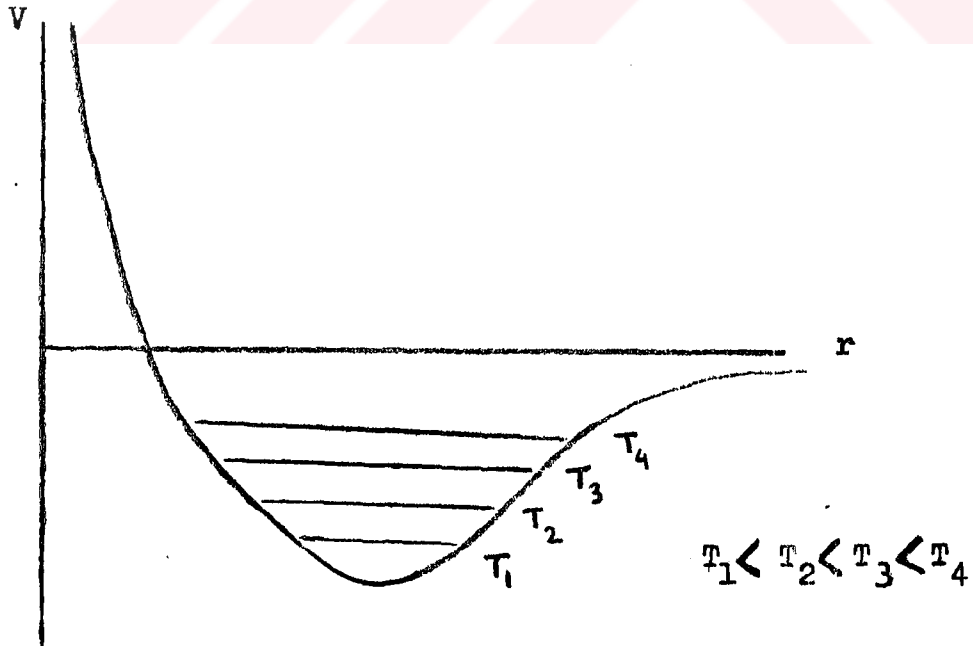
Şekil : 3.6 Alüminyumda bazı elementlerin yayılma hızı [6]

4 . DİFÜZYON MEKANİZMASI

Metal ve alaşımlarda atomik difüzyon ,atomların ,mutlak sıfır sıcaklığının üzerinde bir sıcaklıktan itibaren kristal yapı içinde denge konumlarında titreşimleri ve yeterli sıcaklıkta atomlar arasındaki potansiyel enerji engelini aşmaları ile gerçekleştiği teorik ve deneysel incelemelerden bilinmektedir[10]. Katılarda atomların şekil (4.1) de belirtilen bir potansiyel enerji kuyusundan kurtulup ,denge konumundan ayrılması şekil (4.2) de açıklanan sıcaklık artışlarına bağlıdır.



Şekil : 4.1 Katılarda atomlar için potansiyel enerji kuyusu
(E_i :itme enerjisi, E_{tb} :toplam bağ enerjisi, $E_ç$:çekme en.)



Şekil : 4.2 Sıcaklığa bağlı olarak en yakın iki komşu atom arasındaki uzaklığın değişimi

Atomların birbirlerini etkilemelerinde ,en yakın atomların etkileşim oranı daha fazla olduğundan ,sıcaklık arttıkça bu atomlar arasında uzaklık artar ,sonunda bağlanma enerjisini yenecek titreşim enerjisine sahip atom ,denge konumundan ayrılıp ortama yayılır. Sıcaklıkla atomlar arası uzaklığın artması makroskopik ortamda termal genleşme olarak bilinir. Her maddenin termal genleşme katsayısı atomik düzenine göre ,kendine özgü sabit bir değerdir.

Katılardaki atomik düzenin bir dış kuvvetten etkilenmesi ,atomların birbirine yaklaşılmaya zorlanması durumunda ,atomlar arası yeni uzaklık $r < r_0$ olacaktır. Benzer şekilde atomları birbirinden uzaklaştırmaya çalışan bir kuvvet olduğunda da $r > r_0$ olacaktır. Uygulanan kuvvetle orantılı olarak ,atomlar $r - r_0 = \Delta r$ kadar küçük bir yer değişimi yapacaklardır. Bu durumda potansiyel enerji (V) ile Δr arasında , $V(\Delta r)$ ifadesini Taylor serisine açarak

$$V(\Delta r) = V_{r_0} + \left(\frac{dV}{dr} \right)_{r_0} \Delta r + \frac{1}{2} \left(\frac{d^2 V}{dr^2} \right)_{r_0} \Delta r^2 + \dots \quad (4.1)$$

eşitliğini yazıp , $r=r_0$ da $dv/dr=0$ alıp serinin ikinci mertebeden yüksek kısımlarını ihmal ederek

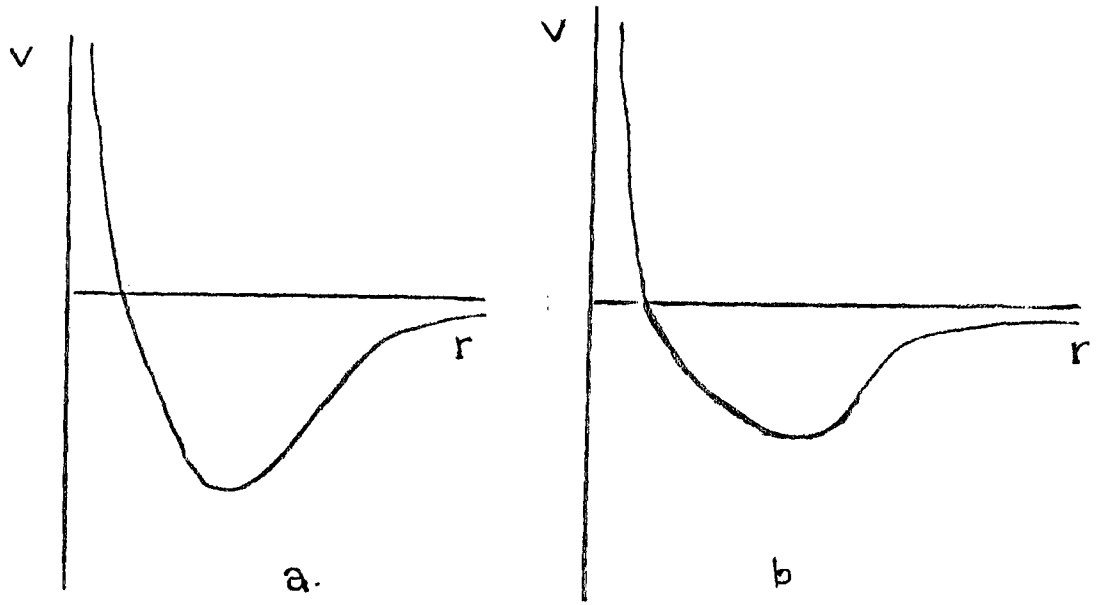
$$V(\Delta r) = V_{r_0} + \frac{1}{2} \left(\frac{d^2 V}{dr^2} \right)_{r_0} \Delta r^2 \quad (4.2)$$

ile enerji ,konum arasındaki ilişkiyi belirten eşitlik elde edilir.Uygulanan kuvvetle (F) ,potansiyel enerji arasında

$$F = - \frac{dV(\Delta r)}{d(\Delta r)} = - \left(\frac{d^2 V}{dr^2} \right)_{r_0} \Delta r \quad (4.3)$$

bağıntısını kurup ,F ile Δr değişkenlerini zor ve zorlanma olarak ifade edip aralarındaki oranı da elastik modül olarak tanımlayabiliriz. Elastik modül ;atomların ,birbirine yaklaştırılması (sıkıştırılması) veya uzaklaştırılması (germe) durumunda aynı değere sahiptir.

Atomlar arasındaki potansiyel enerji ile metalin erime sıcaklığı ve elastik modül değerleri arasında ;yüksek erime sıcaklığı ,yüksek elastik modül ,alçak termal genleşme katsayısı durumunda şekil (4.3)a da belirtilen ilişki ,alçak erime sıcaklığı ,alçak elastik modül ,yüksek termal genleşme katsayısı durumunda şekil (4.3)b de görülen ilişki vardır.



Şekil : 4.3 Potansiyel enerji kuyusu ile fiziksel özellikler arasındaki ilişki

Katı bir madde içinde ,bir elementin yayınımin da yayınan atomlar Q yüksekliğinde potansiyel engelini aşabilecek kadar termal enerji alarak ν ,karakteristik titreşim frekansı ile , engeli aşarlar. Atomun potansiyel çukurundan çıkma olasılığı

$$P = \nu \exp (- Q/RT) \quad (4.4)$$

eşitliği ile gösterilebilir. Burada p atlama frekansı olarak adlandırılır. ν 'nın değeri 10^{14} s^{-1} mertebesinde dir. Yayan atomların aralarında a uzaklığı olan paralel düzlemlerde yer aldıkları kabul edilerek ,düzlemin birindeki s yayınan atomların ,diğer düzlemlerde $s+a.ds/dx$ olacak şekilde olacağı beklenir. Bir saniyede düzlemler arasında geçen net atom sayısı $\tilde{N} \sim p.a.ds/dx$ olacaktır. Eğer yayınan atomların toplam sayısı N ise düzlemin birim alanında $s=a.N$ olur.

Böylece difüzyon akısı

$$J \approx - p.a^2 . (\frac{dN}{dx}) \quad (4.5)$$

olarak yazılabilir. Bu eşitlik Fick'in birinci denklemi ,

$$J_N = - D . \nabla . N \quad (4.6)$$

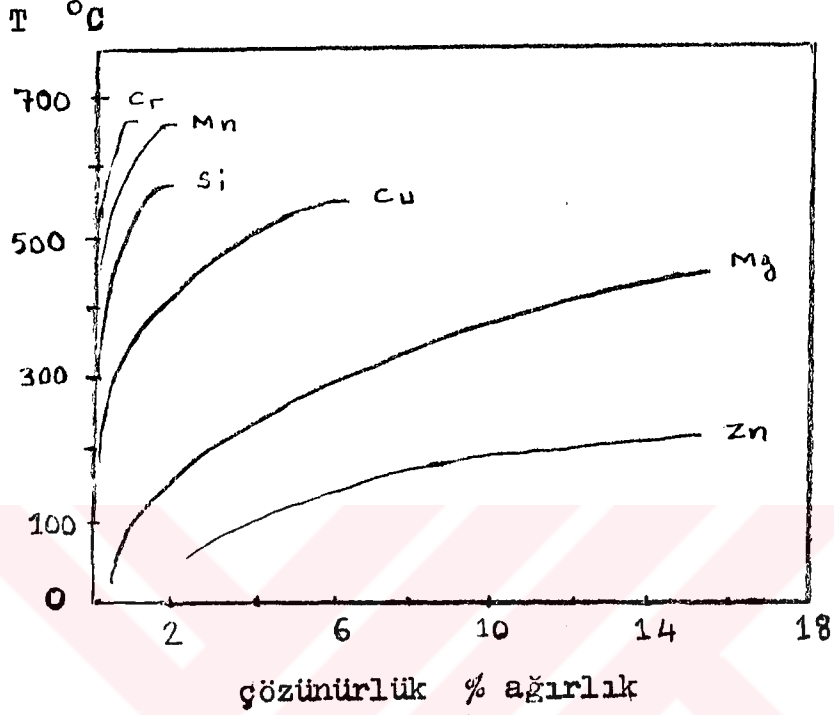
ile karşılaştırılarak ,

$$D = \nu a^2 \exp(- Q/RT) \quad (4.7)$$

yazılır. Burada $\nu a^2 = D_0$ frekans faktörüdür.

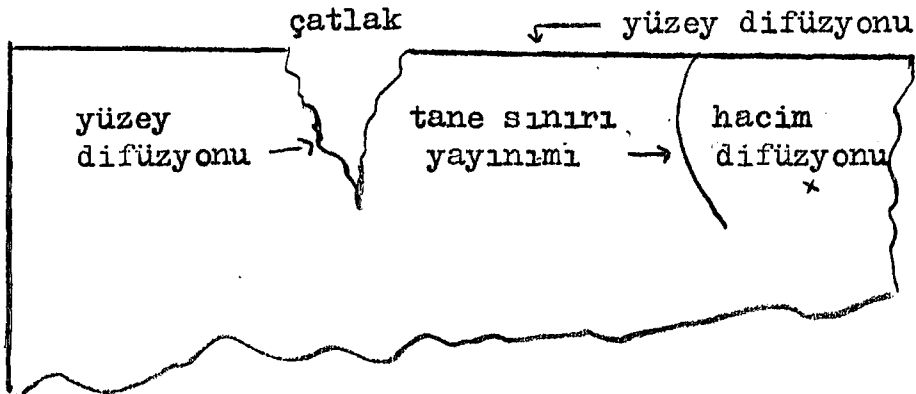
Yayınan atomlar ,yayan atomların potansiyel enerji engelini yenip ,bulundukları konumu değiştirme olanakları arttıkça difüzyon katsayısı büyüyecektir. Deneysel gözlemlerden varılan sonuçlara

göre aliminyum içerisinde ,en büyük aktivasyon enerjisine ve en büyük difüzyon gücüne Zn,Mg,Cu gibi elementler sahiptir.[11],[12] Bu elementlerin aliminyum içerisinde ,yayınmasının sıcaklıkla ilişkisi ve yayınma oranı şekil (4.4)de görüldüğü gibi olmaktadır.



Şekil : 4.4 Aliminyuma en çok katılan alaşım elementlerinin sıcaklığın fonksiyonu olarak denge yayınımları [11]

Potansiyel enerji engeli ,yayınan atomların hareketine katılarda ,sıvı ve gazlardakine göre daha fazla karşı tepki yapar. Bu nedenle kristal yapı atomları arasındaki hacim difüzyonunda Q aktivasyon enerjisi ,sıvı ve gaz halindeki aktivasyon enerjisinden büyüktür. Katılarda hacim difüzyonuna ek olarak aşağıdaki şekilde görüldüğü gibi ,grain sınırlarında maddedeki dislokasyon veya çatlaklarda ve yüzeyde de difüzyon olur.



Şekil : 4.5 Katılarda difüzyon

Şekil (4.5)de görülen üç tür difüzyon da aktivasyon enerjileri arasında ,

$$Q_v > Q_g > Q_s$$

ilişkisi vardır. Burada ,alt indislerde görülen V ;hacim ,g ;grain (tane) sınırı ,s ;yüzey anlamındadır. Benzer şekilde ,D frekans faktörünün ve D difüzyon katsayısının konuma göre alabileceği değerler arasında ;

$$D_{ov} > D_{og} > D_{os} \text{ ve}$$

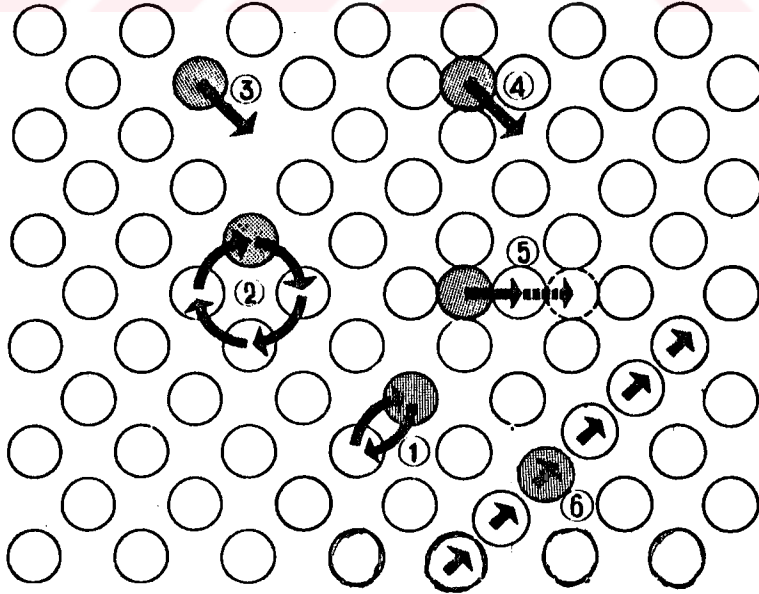
$$D_s > D_g > D_v \text{ ilişkisi kurulabilmektedir.}$$

Kristal yapıdaki atomların hiçbir sıcaklıkta durgun olmadığı, quantum teorisinde

$$E_n = (n + \frac{1}{2})h\nu \quad (4.8)$$

$$n = 0, 1, 2, 3, \dots$$

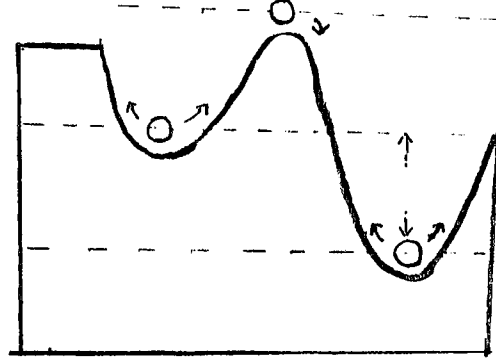
ile belirtilen formülde mutlak sıfır sıcaklığında $n=0$ alarak $1/2.h$ enerjisi ile titreştiği kabul edilmektedir. Dolayısıyla düşük sıcaklıkta ,atomlar kristal hücresindeki yerlerini değiştirmeden sürekli titreşirler. Katılarda fonon denilen ve yukarıdaki formülde quantize olduğu görülen atomik titreşim enerjisi kristale verilen veya alınan ısı enerjisi ile orantılı olarak çoğalır veya azalır. Bir kristal yapıda atomlar ,Q aktivasyon enerjisi kadar ısı tesirinde kaldığında diğer yayınan faktörlerinin de etkisiyle şekil (4.6) da belirtilen mekanizmalarla difüzyon olayını gerçekleştirirler.



Şekil : 4.6 Katılarda atomik difüzyonun oluşum mekanizması

- | | |
|---------------------------------|-------------------------------|
| 1) Basit yer değişimi | 2) Ring mekanizması |
| 3) Boşluk mekanizması | 4) Direkt arayer mekanizması |
| 5) Endirekt arayer mekanizması | 6) Crowdion mekanizması |

Difüzyon mekanizmalarının hepsinde ki ortak bir özellik , maddeye Q ısı verildiğinde atomların titreşiminin artması , yeterli enerjiye ulaşıncada şekil (4.7) de belirtilen modele göre konumunu değiştirmesidir.



Şekil : 4.7 Atomların konumunun enerji ile değişimi

Şekilde belirtildiği üzere ,atomların a konumundan c konumuna geçebilmesi için

$$\Delta G^* = G_{(b)} - G_{(a)} \quad (4.9)$$

serbest enerjinin atoma uygulanması gerekir. Atom bu enerjiyi verilen Q ısı enerjisinden alır ve termal titreşimini artırarak G potansiyel enerji engelini aşar. Q ısını alan ortamda iç enerji değişimi

$$\Delta E = \Delta Q - \Delta W \quad (4.10)$$

ve serbest enerji değişimi

$$\Delta G = \Delta E - T \Delta S \quad (4.11)$$

eşitlikleriyle incelenebilir. Burada ,yapılan iş $\Delta W = P \Delta V$,entropi $\Delta S = \Delta Q/T$ eşitliklerinden saptanabilir. Kristal yapıda yayılan atom sayısı n ;ise iç enerji değişimi , $\Delta E = n_i \Delta E_i$ değeri alır. Bu genel ilişkiler şekil (4.6) da belirtilen difüzyon mekanizmalarının hepsi için geçerlidir. Difüzyon mekanizmalarının kendine özgü özellikleri aşağıda belirtildiği şekildedir.

Basit yerdeğişim mekanizması

En basit atomik yayınma mekanizmasıdır. Yayan ve yayılan maddelerin atomik düzeyde etkileşmelerine göre ,difüzyon olayının olması için gereken aktivasyon enerjisini alan atom komşu atomun yerine geçerek ilerler. Yayılan A atomları ile yayan B atomları aynı türden veya difüzyon için gerekli özellikleri aynı ise bu mekanizma geçerlidir. ÇÜNKÜ deneysel gözlem sonuçlarına göre ,bu özellikler yoksa ,difüzyon katsayıları $D_{AB} \neq D_{BA}$ 'dır. Basit

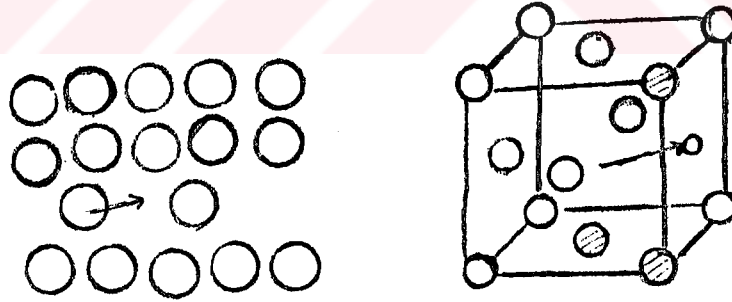
yerdeğişimi mekanizması bağ enerjisi zayıf olan atomlar arasında etkin olabilmektedir.

Ring mekanizması

Atomların yerdeğişimi mekanizması ile difüzyonunda daha çok bu mekanizma etkinlik gösterir. Difüzyonun oluşumunda ,Uç veya daha fazla atom bir halka oluşturacak şekilde biri diğerinin yerine geçerek yayınır. 1930 yıllarında ,metallerde ve alaşımların da self difüzyonun basit yer değiştirme veya ring mekanizması ile olduğu kabul edilmiş daha sonraki yıllarda yayın ortamın atomik düzeninin bozulması durumunda ,Kirkendall olayı ve difüzyon koşullarına göre yayınının değişmesi nedenlerinden bu mekanizmanın metal ve alaşımlarına tam olarak uygulanamayacağı sonucuna varılmıştır. Ring mekanizması daha çok ,bcc metallerdeki difüzyon hızındaki anormallikleri açıklamada yararlı olmaktadır.

Boşluk mekanizması

Bütün kristal yapılarda ,kristal ağıının bazı yerlerinde boşluklar bulunur. Kristal hücresindeki bir atom ,difüzyon için uygun koşulda ise ,bu boşluğa atlar. Böylece atomların ,atom boşluklarına atlaması şeklinde ,boşluk mekanizması ile difüzyon meydana gelir. Fcc metal ve alaşımlarında ,bcc ve hcp metallerde ,iyonik bileşik ve oksitlerde genellikle boşluk mekanizması ile difüzyon olmaktadır. Fcc tip kristallerde boşluk mekanizması ile difüzyon ,şekil (4.8) de görüldüğü gibi olmaktadır.



Şekil : 4.8 Boşluk mekanizması için iki model
a) Kristal ağı kesiti
b) Birim hücre

Boşluk oluştuğunda kristalin iç enerjisi artar. n_v boşluk oluşu - munda iç enerjideki toplam ΔE artış

$$\Delta E = \Delta E_v n_v \quad (4.12)$$

eşitliği ile verilir. Burada ΔE boşluk başına iç enerjideki değişim miktarıdır. Kristal sistemde ,boşluk sayısı arttıkça

,entropide artar. Sistemde N atom varsa ,olusacak n_v boşluk sayısı

$$n_v = N \exp\left(-\frac{\Delta E}{KT}\right) \quad (4.13)$$

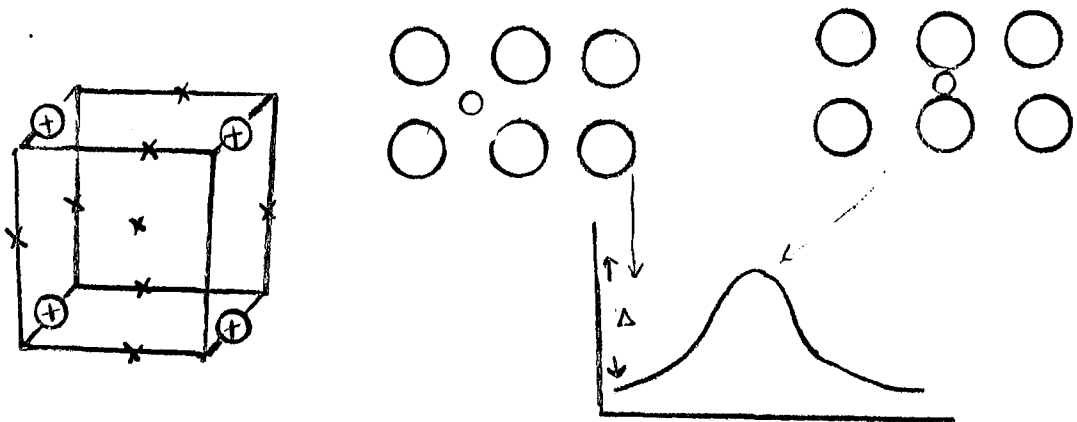
ile saptanabilir. Eşitlikte K bolzman sabitini ,T sıcaklığı göstermektedir. Bazı metaller için ,sıcaklığa bağlı olarak boşluk başına iç enerji değişimi tablo (4.1) de görüldüğü gibi değişmektedir.

Tablo : 4.1 Bazı elementlerde ΔE_v ve n_v değişimi [13]

Element	ΔE_v (eV)	Tm °C	n_v boşluk/cm ³		
			25 °C	300 °C	Tm °C
Ag	1,10	960	$1,5 \cdot 10^4$	$1,5 \cdot 10^{13}$	$7,8 \cdot 10^{17}$
Al	0,76	660	$1,0 \cdot 10^{10}$	$1,2 \cdot 10^{16}$	$5,0 \cdot 10^{18}$
Cu	1,00	1083	$1,1 \cdot 10^6$	$1,4 \cdot 10^{14}$	$9,0 \cdot 10^{18}$
Ge	2,00	958	< 1	$1,3 \cdot 10^5$	$8,2 \cdot 10^{13}$
Mg	0,89	650	$4,4 \cdot 10^7$	$6,4 \cdot 10^{14}$	$5,7 \cdot 10^{17}$

Direkt arayer mekanizması

Yayan katı maddenin kristal hücresinde atomlar arasında bulunan katkı atomlar komşu hücrede benzer konuma transfer olarak yayınabilmektedir. Şekil (4.9) da açıklandığı gibi fcc tip kristalde ,yayan element atomlarına göre küçük boyda olan katkı atomlar yayınır.



Şekil : 4.9 Direkt arayer mekanizması ile fcc kristal yapıda atomik difüzyon (x yayınan atomları ,G=FC(x) serbest enerji değişimi , gbs göstermektedir.)

Bu difüzyon mekanizmasında ,yayan element atomlarına göre küçük boyutta olan yayılan atomların kristal yapıyı bozmadıkları bilinmektedir. Alaşımlarda ,katkı element atomları ,özellikle karbon gibi metalik olmayan element atomları arayer konumlarına yerleşirler. Yayınan atomlar ,yayan ortamın atomlarından fazla büyükse bu mekanizma etkisini kaybeder ,difüzyon başka mekanizmalarla olur. Şekil (4.9) da görüleceği gibi ,direkt arayer mekanizmasında ,yayınan atomun serbest enerjisi ,atomun konumuna göre değişmektedir. Bu difüzyon mekanizmasında atomlar

$$\Gamma = z \nu \exp(- \Delta G_m / RT) \quad (4.14)$$

eşitliğiyle saptanabilen atlama frekansı ile kararlı konumlarını değiştirirler. Burada z ,en yakın atom sayısı , ν atomun titreşim frekansıdır.

Endirekt arayer mekanizması

Kristal hücrede ,bir atomun şekil (4.6) da görüldüğü gibi ,en yakın komşu atomu iterek onun yerine geçmesi ve itilen atomun da komşu birim hücrede konuşlanması şeklindeki difüzyon mekanizmasına endirekt arayer difüzyon mekanizması denir. Özellikle fcc kristal yapıli metallerde bu mekanizma ile kristal yapı bozulmaya uğramadan yayınma gerçekleşebilmektedir.

Crowdion mekanizması

Yayınan atomun ,metal kristal yapısındaki atomları bir çizgi boyunca ,iterek ilerlemesi crowdion mekanizması olarak bilinir. Bu mekanizma da yayınan atom metalin kristal yapısındaki atomları kararlı durumlarından ayırıp ötelediği için atomların serbest enerjisi büyüür. Böylece dislokasyon hattı boyunca ,düşük sıcaklık- larda yayınma gerçekleşir.

5 . DİFÜZYON ÖLÇÜM YÖNTEMLERİ

Saf metal ve alaşımlarda difüzyon ölçümü ve analizi çeşitli fiziksel ve kimyasal ölçü aletleri ve farklı yöntemler kullanarak yapılmaktadır [9] [13]. Difüzyon ölçüm ve analizin de ,yayılan kütleinin türü ve miktarını saptamak temel amaçtır. Kullanılan ölçü aletlerinin ,her kütle türünü ,her miktarda saptayıp ölçebilmesi mümkün olmasa da ,ölçü aletlerinin birinin ölçemediğini diğeri ölçerek eksikliği kapatmaktadır. Kullanılan ölçü teknikleri ,atomik emisyon spektrometresi ,atomik absorpsiyon spektrometresi , x-ışını floresansı ,aktivasyon analizi ,kütle spektrometresi ,moleküler absorpsiyon spektrometresi ,polarografi gibi alanları kapsamaktadır. Bu ölçü teknikleri ile ,analiz edilen madde içinde yayınan madde türünü ve miktarını saptamak için ,ölçümü amaçlanan madde limiti,aktivasyon analizinde 10^{-12} grama kadar inebilmektedir. Analiz edilen maddelerdeki elementleri tür ve miktar olarak belirlemede ,analiz tekniklerinin kullanım yüzdesi tablo (5.1) de belirtildiği gibi değişmektedir.

Tablo : 5.1 Bazı elementlerin tesbitinde ,analiz teknikleri -
nin kullanım yüzdesi [13]

	AA	AS	AAS EF	ES	P	XRF
As	23	41	---	15.4	12.3	7.3
Au	50	19	31	---	---	---
Bi	20	---	---	50	30	---
Co	10	22	30	27	11	---
Cr	8	21	23	29	11	8
Cs	25	---	---	25	---	50
Cu	9	19	33	15.5	15.5	8
Fe	7.5	32.5	32.5	16	4	7.5
K	16	---	84	---	---	---
Mn	5.5	20	35	19	11	9.5
Mo	8	32	13	30	11	6
Na	22	---	78	---	---	---
Ni	10	20	29	27	10	4
Sb	25	30	---	25	20	---
Si	13	45	---	42	---	---
Sn	8.5	23	---	46	14	8.5
W	31	38	---	31	---	---
Zn	9	8	41	15	18	9

AA : Aktivasyon analizi
AS : Absorbsiyon spektrometresi
AAS-EF : Atomik absorbsiyon spektrometresi.
ES : Emisyon spektrometresi
P : Polarografi
XRF : x-ray floresansı

Diffüzyon ortamına yayılan maddenin türünü ve miktarını belirlemede kullanılan ölçüm yöntemleri ,genelde atomik ve nükleer kökenli elektromagnetik spektrumun ,şekil (5.1) de görülen bölgelerinin değerlendirilmesi ile uygulamaya konulan teknikler ile elektriksel gerilim ve akım referans alan elektrometrik analiz tekniklerini kapsamaktadır. [13],[14]

Şekil : 5.1 Elektromagnetik spektrum ve kaynağı

dalga boyu	spektrum bölgesi	kapsadığı alan
1 Å	γ ışınları	nükleer
100 Å	x ışınları	15 elektron seviyeleri
20 nm	ultraviyole ışınları	atom ve molekül iyonizasyonu
800 nm	görünür ışık	valans elektronları
25 mm	kızılötesi ışınlar	moleküler titreşim
400 mm	mikrodalgalar	elektron spin rezonans
25 cm	radio dalgaları	nükleer manyetik rezonans

NUkleer ,atom ve moleköl enerji düzeylerinin quantize olması nedeniyle bu enerji düzeylerinin uyarıldığında yayılan elektromagnetik dalgaların ölçümü uyarılan hedef maddenin türü ve miktarı hakkında kesin bilgiler vermektedir. Bu temel kavramlardan hareketle oluşturulan γ spektrometresi ,x-ışını floresans spektrometresi ,elektron spektroskopisi ,kütle spektrometresi ,atomik absorpsiyon ve emisyon spektroskopisi ,moleküller absorpsiyon spektrometresi ,polarografi gibi ölçüm sistemleri laboratuvarlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Analiz edilen maddeler ;dış görünüşleri bozulmadan (hasarsız) veya bir parçası ana gövdeden ayrılarak (hasarlı) ölçüm için kullanılır. Analiz edilecek maddenin gerekli miktarı ve boyutları ,her ölçüm yöntemine göre tablo 5.1 de belirtildiği şekilde değişmektedir.

Tablo : 5.2.Madde analiz teknikleri

metotlar	dedeksiyon için minimum element miktarı (gram)	ölçüm için gerekli minimum madde miktarı	analiz süresi
Aktivasyon analizi	$>10^{-12}$	1 mg - birkaç g	1 dakika - birkaç hafta
Kütle spektrometresi	$10^{-3} - 10^{-9}$	birkaç mg	birkaç saat
Moleküller absorpsiyon spektrometresi	$10^{-5} - 10^{-7}$	10 mg- 1 g	birkaç saat
Emisyon spektrometresi (Cark ,plazma)	$10^{-5} - 10^{-6}$	10 - 100 mg	1-2 saat
Alev emisyonu ve atomik absorpsiyon spektrometresi	$10^{-6} - 10^{-7}$	0,1 - 1 g	1-2 saat
Alevsiz atomik absorpsiyon spektrometresi	$10^{-11} - 10^{-12}$	0,1 - 2 mg	1-2 saat
x-ışını floresansı	$10^{-3} - 10^{-5}$	0,1 - 2 g	1-2 saat
polarografi	$10^{-6} - 10^{-7}$	0,1 - 1 g	1-2 saat

Aktivasyon analizi ve x-ışını floresansı tekniği diğer tekniklerden farklı olarak maddeyi hasara uğratmadan analiz edilmektedir. Difüzyon olayını incelerken yayınma olayının incelendiği madde ,kesitlere ayrılarak incelendiğinden hasarlanma söz konusu olmamakta ,ancak bu iki teknik analiz ettiği maddeyi analizden önce aldığı şekilde bıraktığından genelde hasarsız

sağlanabilmektedir.

Analiz edilecek maddenin ,ölçüm için hazırlanması ;deney koşullarına kullanılan malzemelere ve ölçü cihazlarına göre değişir. Genellikle kesit alma yöntemi ile hazırlanan örnek ,ölçü cihazlarında analiz edilerek difüzyon analiz edilir. Radyoaktif maddenin yayılımının analizinde ,bu metot ve kalan aktivite ,yüzey azaltma ,otoradyografi gibi diğer yöntemlerde kullanılır.

Metalin metale difüzyonunu incelemek için bütün yöntemlerde , yayınacak metal ,yayınan metalin üzerine kaplanarak belirli bir süre erime sıcaklığının altında ısıtılır. Daha sonra analiz yöntemine göre örnekler alınarak ölçülür. Yayınan madde ile yayınan madde arasında oksidasyon oluşturarak difüzyon gücünü azalttığından dolayı oksijenin bulunmamasına özen gösterilir. Bunun için oksijenden izole edilmiş kapalı sistemler düzenlenir.

5.1 Kesit Alma Yöntemi

Bu metot da ,analiz edilecek madde seriler halinde kesitlere ayrılır. Bu kesitlerin kalınlığı ,yayınan maddenin konsantrasyonunun ölçülebilmesini sağlayacak düzeyde olmasına dikkat edilir. Kesit kalınlıkları $x \approx 3\sqrt{Dt}$ ile belirtilen bağıntıdan hareketle , minimum $2,5.10^{-3}$ cm olacak şekilde alınarak ,örnek hazırlanır. Genellikle on adet kesit alınarak maddeden toplam $2,5.10^{-2}$ cm kalınlıkta kısım ayrılır. Her kesit mikrotomla kesilerek alınır ve mikro terazide tartılır. Her kesitin orta noktasından yüzeye olan uzaklık hesaplanır. Maddenin her kesiti aynı ağırlıklarda biriktirilir. Örnek radyoaktif ise bir sintilatör dedektör ile aktivitesi ölçülür. Deney koşullarına göre ikinci bölümde belirtilen formüllerden de yararlanılarak ,kesit örneklerinin aktivitesinin e tabanına göre logaritması alınarak difüzyon yol uzunluğunun karesine göre değişimini gösteren grafik çizilir. Difüzyon hızını bulmak için bu grafiğin eğimine eşit olan $1/4.D.t$ bağıntısından yararlanılır. Isıl işlem süresi bağıntıda yerine konarak difüzyon katsayısı (D) bulunur. Kesit alma yöntemi ile hazırlanan örnekler tablo (5.1) de belirtilen **tekniklerle** ölçülüp analiz edilebilmektedir. Kesit alma yöntemi ile analiz edilecek maddeden **1 μ g** ağırlığa kadar kesit parça alınabilmekte ve böylece difüzyon katsayısı 10^{-14} cm²/saniye kadar olan yayılma olayı incelenebilmektedir.

5.2 Kalan Aktivite Metodu

Kalan (residual) aktivite metodunda ,kesit alma metoduna benzer şekilde ,torna ,zımpara ,taşıma ,asitle kazıma veya anodize tekniklerinden biri kullanılarak metalden **x μ m** kalınlıkta kesit alınır. Bu işlemden önce ve her kesit aldıktan sonra ,kesitin değil ,geri kalan ana metal parçasının analizi yapılır. Bu yöntem daha çok ,radyoaktif izotop kullanılarak yapılan difüzyon incelemelerinde kullanılır. Buna göre ,bir radyoizotopun metale yayılımında x kalınlıkta toplam aktivite I ise ,dx kalınlık değişiminde ,aktivite değişimi

$$dI = k \frac{S}{\pi D_T t} \exp\left(-\frac{x^2}{4D_T t}\right) \exp[-\mu(x-x_n)] \quad (5.1)$$

şeklinde belirtilir. Burada A_0 başlangıçtaki aktivite, μ yayan maddenin radyasyon absorpsiyon katsayısı, x_n , n 'inci tabakanın kalınlığı, k sayım geometrisine bağlı sabittir. (5.1) eşitliğinin integrali alınarak

$$I_n = k \frac{s}{\sqrt{\pi D_T t}} \int_{x_n}^{\infty} \exp\left(-\frac{x^2}{4D_T t}\right) \exp[-\mu(x-x_n)] dx \quad (5.2)$$

ve denklemin çözümünden

$$\mu I_n - \frac{dI_n}{dx_n} = k \frac{s}{\sqrt{\pi D_T t}} \exp\left[-\frac{x_n^2}{4D_T t}\right]$$

veya

$$\mu I_n - \frac{dI_n}{dx} = k c(x_n) \quad (5.3)$$

bağıntıları elde edilir.

Bu metot, radyasyonun en az ve en çok absorblandığı iki limit durumunda önem kazanmaktadır.

Radyasyonun az absorblanması - kuvvetli γ ışını

Bu durumda $\mu I_n \ll dI_n/dx_n$ dir. Böylece (5.2) eşitliğini

$$\frac{dI_n}{dx_n} = k \frac{s}{\sqrt{\pi D_T t}} \exp\left(-\frac{x_n^2}{4D_T t}\right)$$

şeklinde yazarak,

$$\ln\left(-\frac{dI_n}{dx_n}\right) = \text{sabit} + \left(-\frac{x_n^2}{4D_T t}\right) \quad (5.4)$$

denklemleri elde edilir. Bu denklemin grafiksel analizinden D_T değeri bulunur.

Radyasyonun çok absorblanması - zayıf ışını

Burada da $\mu I_n \ll dI_n/dx_n$ koşulundan hareketle

$$\mu I_n = k \frac{s}{\sqrt{\pi D_T t}} \exp\left(-\frac{x_n^2}{4D_T t}\right)$$

veya

$$\ln I_n = \text{sabit} - \left(- \frac{x_n^2}{4D_T L} \right) \quad (5.5)$$

eşitliği elde edilir. $\ln I_n$ 'nin x 'nin fonksiyonu olarak grafik çizildiğinde elde edilen eğrinin eğimi olan $-1/4D_T L$ 'den D_T bulunur.

İncelenen örnek maddenin orta düzeyde γ veya $\gamma + \beta$ yayınlanması durumunda (5.5) eşitliği kullanılır.

Kalan aktivite yöntemi ,kesit alma yöntemine göre daha az tercih edilir. Ancak difüzyon katsayısı çok küçük (10^{-13} - 10^{-14} cm²/sa - niye) olan örnekleri analiz etmede daha kullanışlıdır.

5.3 Yüzey Azaltma Metodu

Bu metod ,radyasyon absorpsiyon katsayısı büyük olan metallerde ,radyoaktif izotopların yayınlarını incelemeye kullanılır. Deneysel işlemlerde ,kesit almaya ihtiyaç kalmadan ,her t sürede ,T °C de ısıtılmadan sonra ,maddenin toplam radyoaktivitesi ölçülür.

Yüzey azaltma metodunda da ,yayınan maddenin bulunduğu bölgenin kalınlığının x olduğunun ve dx dilimlerde ,I toplam aktivitenin di dağılımını göstereceğini düşünerek ,

$$dI = \frac{k.s}{\sqrt{\pi Dt}} \exp\left(-\frac{x^2}{4Dt}\right) \exp(-\mu x) dx$$

yazılabilir. Bu eşitliğin ,

$$I = \frac{k.s}{\sqrt{\pi Dt}} \int_0^{\infty} \exp\left(-\frac{x^2}{4Dt} - \mu x\right) \quad (5.6)$$

integralinden ,

$$I = k.s.\exp\left(\frac{\mu^2}{4} Dt\right).[1-\text{erf } \mu\sqrt{Dt}]$$

veya

$$\frac{I}{I_0} = \exp\left(\frac{\mu^2}{4} Dt\right)[1-\text{erf } \mu\sqrt{Dt}] \quad (5.7)$$

denklemini elde edilir. I toplam aktivitenin t süresi ile bağıntılı olarak değiştiği gözönüne alınarak , $I/I_0=F(\mu^2 Dt)$ grafiği çizilir. Deneysel sonuçlara göre çizilen eğrinin eğiminden D difüzyon katsayısı bulunur. Yüzey azaltma metodu ,radyasyon absorpsiyon katsayısı küçük olan metallerdeki yayınmayı belirlemede kullanılmaktadır. Bu metotla radyasyon absorpsiyon katsayısı büyük olan metallerde 10^{-13} - 10^{-16} cm²/saniye değerine kadar difüzyon katsayıları ölçülebilmektedir.

5.4 Otoradyografi

Otoradyografi yöntemi ,diğer difüzyon ölçüm yöntemlerine benzememekte ,yayınan radyoizotopun ışınlarının fotoğraf emülsiyonunda meydana getirdiği karartmalardan yararlanarak difüzyon gücünü belirlemektedir. Radyoaktif olmayan elementlerin yayılımı bu metotla ölçülebilmektedir.

Bu yöntemde ,incelenecek madde yüzeyden itibaren genellikle , yüzey normali ile 90°'lik açılar yapacak şekilde ,kesitlere ayırılır. Bu parçalar ,kesim yüzeyleri bir x-ışını filmine temas edecek şekilde konularak filmi ışınlamaları beklenir. Poz süresi , film türüne göre deneysel gözlemlerle elde edilen verilere göre ayarlanır. Bu amaçla ,difüzyon için kullanılan ,metal yüzeyindeki birkaç kırı aktivitedeki izotopun başlangıçta 24 saat sürede filmde oluşturduğu karartma ölçülür. Genellikle kodak c veya m tip standart filmler kullanılarak ,radyoaktivite şiddeti ile orantılı oluşan film kararması bir mikrodensiyometre ile ölçülür. Otoradyografi özellikle düşük veya orta enerjide (1 MeV'dan az) β ışını yayınlayan izotopların yayılımını ölçmeye daha elverişlidir. Gamma aktivitesi düşük izotopların da yayılımı bu metotla incelenebilmektedir.

Gözlem sonuçları ,

$$C(x)=C(0).\exp(-\frac{x^2}{4Dt}) \quad (5.8)$$

$$P(x)=P(0).\exp(-\frac{x^2}{4Dt}) \quad (5.9)$$

denklemleri ve bu denklemlerin grafiklerinde kullanılarak difüzyon hızı bulunabilmektedir. Bu eşitliklerde , $C(0)$ başlangıçta metal yüzeyinde ki yayınan madde konsantrasyonunu , $C(x)$ x uzaklıktaki konsantrasyonu , $P(0)$ ısıtıl işlem öncesi filmin fotoğrafik yoğunluğunu , $P(x)$,metal yüzeyinden x uzaklıkta alınan örneğin ışınlanması sonucunda oluşan fotoğrafik yoğunluğu göstermektedir. (5.8) ve (5.9) bağıntıları t süresince ısıtıl işlem sıcaklığının sabit tutulması durumunda geçerlidir. $P(x)$ 'in $C(x)$ ile orantılı olarak değiştiği gözönüne alınarak $\ln P(x)=F(x^2)$ fonksiyonunun grafiğinin -1/4Dt eğiminden difüzyon hızı bulunur. Otoradyografi yöntemi ile difüzyon katsayısının ölçüm limiti ,ısıtıl işlem süresine ,mikrodensiyometrenin duyarlılığına ve kullanılan film tipine göre değişir. Bu yöntemle 10^{-11} - 10^{-12} cm²/saniye değerine kadar difüzyon katsayısı saptanabilir. Bu yöntemle ayrıca grain sınırlarındaki difüzyon filmde görünür durumda saptanır.

Metal elementlerin radyoizotoplarını kullanarak ,atomik difüzyonu incelemeye uygulanan ölçüm yöntemleri ;analiz edilecek maddeye ,radyoaktif izotoptan yayınlanan ışınların şiddetine , difüzyon katsayısının değerine göre değişir.Tablo (5.2) de bu yöntemlerin özellikleri,birbirlerine göre farkları belirtilmiştir. Herbir yöntemin yararlanabildiği radyasyon türü ve şiddeti + işareti ile gösterilmiştir.

Tablo : 5.2 Radyoizotopların difüzyonunun incelenmesi

Radyasyon türü ve şiddeti			Difüzyon katsayısı		Başlıca izotoplar
Kuvvetli β ve/veya kuvvetli γ	Zayıf β	Zayıf γ	$10^{-5}-10^{-11}$	$10^{-10}-10^{-14}$	
+	-	-	1	1a, 2	P^{32} , Lu^{170} , Hf , Ta
+	+	-	1	1a	Co^{60} , Mo^{99} , W^{185} , V^{48} , Cu^{64} , Ag^{110}
+	+	+	1	1a	Mo^{99} , Au^{198}
-	+	-	2, 3, 4	2, 3	Ni^{63} , Fe^{55} , In^{114} , Pd^{107}
-	-	+	1	1a	Sn^{113} , U^{238}
-	+	+	1, 2, 3, 4	1a, 2, 3	Nb^{95} , Cr^{51} , Mn^{54} , Zr^{95}
+	-	+	1	1a	Ru^{83} , Zr^{97}

- 1 - Kesit alma (tornalamakla)
1a- Kesit alma (eğeleme veya kazımakla)
2 - Kalan aktivite
3 - Yüzey azaltma
4 - Otoradyografi

radyoizotopların metal veya metal alaşımlarında yayılımının incelenmesi suretiyle ,radyoizotopun radyoaktif olmayan ana elementlerinde yayılımı hakkında gerekli bilgi alınabilmektedir. Zira atomik difüzyonda ,kimyasal bakımdan aralarında bir fark olmayan izotopların yayılımı aynı özellikleri taşımaktadır. Bu nedenle ;özellikle self difüzyon olayında ,A element atomlarının , A elementinden oluşmuş metalde yayılımını radyoizotop kullanarak incelemek mümkün olmaktadır. Deney için bir elementin radyoaktif izotoplarını seçerken ,yarı ömrü çok kısa olan radyoaktif maddenin kısa sürede kaybolacağı ,yarı ömrü çok uzun olanların aktivitesinin çok zayıf olacağı gözönünde tutulur. Radyoaktivitenin çok yüksek olması ,ayırma güçlüğü nedeniyle tercih edilmez.

6 - ALİMİNYUM ALAŞIMLARINDA ATOMİK DİFÜZYON ÖLÇÜM YÖNTEMLERİ

Aliminyum ve aliminyum alaşımlarında atomik difüzyon ,1-5

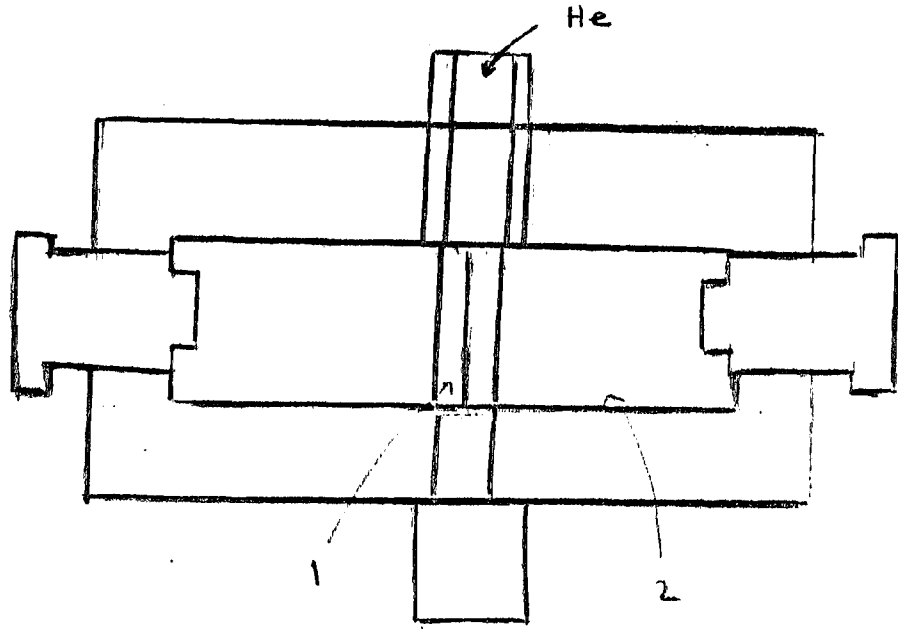
bölümlerde açıklanan teorik ve pratik esaslara uygun olarak gerçekleştirildiği ,yakın tarihlerdeki araştırmalarda ,yeni teknik ve yöntemler kullanılarak ,vurgulanmaktadır. Bir yün ipliğinin içine batırıldığı boyanın yayılımı sonucunda sahip olduğu renk tonunu bir başka üretimde yakalamanın zorluğu gibi alüminyum alaşımlarında ,bir metalin atomlarının yayılımında da deney koşullarının ,her difüzyonda aynen sağlanmasının zorluğu ,hatta atomik düzeyde mümkün olmayışı gerçeği ile karşılaşılmaktadır. Difüzyonla ,alüminyum veya alüminyum alaşımları yapısına sokulan her element yeni bir ürün ortaya çıkarmaktadır. Bu yeni ürünün fiziksel ve kimyasal özellikleri ,yapıya yayılan yabancı elementlerin türüne ,miktarına ve kristal yapıda meydana getirdiği yeni düzenlemeye göre değişir. Alüminyum alaşımlarında atomik difüzyon ,alüminyumdaki difüzyona benzer ancak alaşımdaki alüminyum dışındaki elementlerin yüzde miktarı değiştikçe difüzyon hızı ,

$$D(c)=D(0)(1+bc) \quad (6.1)$$

eşitliğinde belirtildiği gibi artar[15]. Burada yayılan metal atomlarının ,saf alüminyum da difüzyon hızı $D(0)$,alaşımdaki katkı element atomlarının konsantrasyonu c , D 'nin c den etkileneceği (duyarlılığı) b ile gösterilmiştir. Deneysel gözlemlere göre düzenlenmiş (6.1) eşitliği ,katkı atomlarının ,ana yapının kristal ağını bozmaları ,böylece yayılmalarının kolaylaşması nedeniyle ,diğer metallerdeki difüzyon olayında da geçerli olmaktadır. Bu eşitliğin ,bölüm 3.4'de açıklanan ,atomik büyüklük ,değerlik ,elektronegative faktörü ve benzeri etkenlerle birarada değerlendirilmesi ,gerekmektedir.

Metal difüzyon deneylerinde ,gözlem sonucunu olumsuz olarak etkileyen oksitlenme faktörünü gidermek için ,her araştırıcı kendine özgü düzenekler kullanmaktadır. Amaç oksijenin ,yayan ve yayılan metal çiftinin temas yüzeylerine ulaşmasını önlemektir. Alüminyum ve alaşımlarına metal atomlarının difüzyonunu incelerken oksidasyon etkisini ortadan kaldırmak için ;fiziksel ve kimyasal içerikli önlemler alınmaktadır. W. Alexander ve L. Slifkin tarafından [15] yayılan madde olarak kullanılan Ag, Cu ,Fe gibi elementler AgCl ,CuCl ,FeCl şeklinde ,kullanılarak oksidasyon etkisi ortadan kaldırılmıştır. Bu yöntemde ,alçak sıcaklıkta difüzyon işlemine başlamadan önce kısa bir süre 620 °C gibi yüksek sıcaklıkta tutulan yayan-yayılan madde sisteminde ,Cl buharlaşarak yüzeyden ayrılmaktadır. Toplam difüzyon süresinin yüzde 5'ini aşmayan bu işlem ,difüzyon süresinin uzun tutulması ile daha kısaltılarak ihmal edilebilir hale getirilebilir. Aksi halde ,hata payı olarak gözönüne alınır. Bu yöntemde ,Cl atomlarının difüzyon yüzeyinde oluşturduğu az miktardaki çukur ,ilk kesit de ortadan kaldırılabilirdiğinden hata olarak gözönüne alınmaz.

Difüzyon deneylerinde oksidasyon etkisine karşı shao-ning mei ve H. Huntington ekibi [16] şekil (6.1) de görülen helyum gazlı sistemi kullanmışlardır.



Şekil : 6.1 Difüzyonda oksidasyonu önleme düzeniği
1. Yayan+yayınan madde 2. Piston

Bu ekip ,Pb elementinin ,Pb-Ni alaşımında oksidasyonsuz difüzyonu için ;her iki maddeden de kalınlığı 3 mm ,çapı 5 mm olan diskler kesip ,asetik asit ,hidrojen peroksit ve saf suda duruladıktan sonra , bekletmeden şekil (6.1) deki sisteme yerleştirip He atmosferinde on saat kuruttuktan sonra ısıtıl işlem yapılmıştır.

Alüminyumda self difüzyon veya alüminyum alaşımlarında radyoizotopların difüzyonu incelenirken ,radyoizotopların temini ve yararlanılması çeşitli yöntemlerle olur. Genelde ,radyoizotop - lar uygun elementlerin n ,p ,reaksiyonuna tabi tutulması suretiyle hazırlanır. T. Lundy ve J. Murdock[17] tarafından alüminyumda self difüzyonu incelemek için yapılan araştırma da , ^{27}Al nin ,bir siklotrondan elde edilen 22 MeV'lık protonlarla bin saat süreyle ışınlanması sonucunda oluşturulan ^{26}Al kullanılmıştır. Elde edilen ^{26}Al ,vakumlu fırında Al_2O_3 kaptaki eritilip 0,015 cm kalınlıkta , 1,25 cm çapında levhalar hazırlanılmıştır. Aktivitesi 5 sayım/saniye olan Al-26 levhalar elektrolitik yöntemle , ^{27}Al difüzyon ortamı mekanik ve elektrolitik yöntemle parlatılıp ,quartz tüpte basınç uygulayıp sıkıştırılmış ,bu durumda 450 °C sıcaklıkta ısıtıl işlemi tabi tutulan sistem kesit alma metodu ile spektrometresi kullanılarak incelenmiştir.

Metal oksidasyonun difüzyondaki etkisini önlemek için bir yöntemde yayan metalin üzerine ,yayınan metali vakumlu bir fırında buharlaştırarak kaplamaktır. N. Peterson ve S. Rothman [18] tarafından bu yöntemle alüminyum üzerine ^{65}Zn , ^{64}Cu , ^{110}Ag kaplanarak yapılan difüzyon analizinde ısıtıl işlemi kadar ve ısıtıl işlemi sırasında oksijenle temas kesildiği için oksidasyon etkisi ortadan kaldırılmıştır.

Aluminyum alaşımlarında ,alaşım elemanı metal atomlarının yayınıma ,yüzeyden sürekli yapıya girecek oksijen gazı atomlarının oksidasyon etkisini engellemek için ,alaşım elemanı bir metal ile kaplayarak gerçekleştirilebilmektedir [19]. Bu yöntemde ;başlangıçta ,alaşım parçasının içindeki difüzyonun ,kaplama içindeki difüzyona göre daha hızlı olduğu görülmekte ,ancak difüzyon süresinin büyük bölümünde birbirlerine eşdeğer oldukları izlenmektedir.

Aluminyum ve alaşımlarında ,metal atomlarının yayınıma olduğu gibi ,karbon ve benzeri ametal atomlarının yayınıma da , alaşımdaki katkı atomların boyutları difüzyon hızını bölüm 3.4 de belirtilen kurallara göre etkiler [20]. Ancak ,oksijene benzer şekilde difüzyonu büyük oranda bileyici etki yapmaz.

Difüzyon neticesinde ,kristal yapıdaki değişiklik veya bozulmalar ,x-ışını topografisi ile incelenir. x-ışını topografisi ,çeşitli difraksiyon tekniklerini kapsayan bir uygulamadır. Son yıllarda uygulamaya konulan x-ışını fotoonlarını floresans ekranda görüntü hale getiren ,real time x-ışını sistemi ile metal yapısı anında görüntülü olarak incelenmektedir [21]. Bu sistemde film gerekmediği gibi ,görüntünün filmde oluşması için saatlerce beklemekte gerekmemektedir.

6.1 Deneyisel Sistemler ve Ölçüm Yöntemleri

Aluminyum alaşımlarında metal atomlarının difüzyonu ,önceki bölümlerde açıklanan teorik ve deneyisel esaslara göre incelenerek ,difüzyon hızı ,yayınan atom konsantrasyonu bulunabilmekte ve difüzyon mekanizması açıklanabilmektedir. Bu çalışmada :

Kesit alma ve yüzey azaltma yöntemleri kullanılmış ,örnek maddeler bölüm 6.1.1 de belirtilen atomik emisyon spektrometresi ve bölüm 6.1.2 de belirtilen γ -spektrometresi kullanılarak analiz edilmiştir. Uygulanan ölçüm yöntemlerinde ,oksidasyon etkisinden kısmen korunma önlemleri alınmış ,farklı deney koşullarında yapılan gözlemlerde elde edilen sonuçlar ,teorik kabuller ve literatürde belirtilen sonuçlar ile karşılaştırılmıştır.

6.1.1 Atomik Emisyon Spektrometresi

Atomik emisyon tekniği ;incelenecek maddenin atomlarının , uygun bir enerji kaynağı ile uyarılması sonunda ,normal konumlarını terkeden dış elektronların ,yerlerine dönerken aldıkları enerjiyi elektromagnetik dalga halindeki geri vermeleri olayından yararlanarak ,bu enerjiyi nitelik ve nicelik olarak ölçme esasına dayanmaktadır. Tablo (6.1) de özellikleri belirtilen ,elektrik arkı ,argon plazma ve laser gibi enerji kaynaklarının maddeyi buharlaştırması ,atomlarını eksite etmesi sonunda bohr teorisine göre ,

$$W_i = - \frac{2\pi^2 m e^4}{h^2} \frac{1}{n^2} \quad (6.2)$$

$$i = 1, \dots, \infty$$

eşitliği ile ifade edilen enerji seviyelerin de dönen elektronlar

,aldıkları enerji kadar ,enerji seviyesi değiştirip ,

$$\nu = \frac{W_{i+1} - W_i}{h} \quad (0.3)$$

bağıntısına göre ışık yayınları. Burada ;m elektronun kütlesini ,e ,elektronun yükünü ,h plani sabitini ,n seviyeleri (tam sayı) ,W ,enerjiyi , ν yayınlanan ışığın frekansını göstermektedir.

Tablo : 0.1 Uyarıcı Kaynaklar [13]

Kaynaklar	Nitelikleri	Oluşturduğu Sıcaklık °C
Alev	Hidrojen ve Asetilen Butan v.b. yakıtlar	1500 - 3000
Elektrik alanı	Elektrik arkı 2 - 30 A AC 50 - 5000 V AC	2000 - 8000
Elektrik alanı	Elektrik kıvılcımı 100 A DC 400 - 15000 V DC	---
Elektrik alanı	Elektrik deşarj lambası 300 - 1500 V	---
Elektrik alanı	Plazma 0,5 - 5 KW 40 - 2500 MHz	3000 - 10000
Lazer	Çok yoğun homojen ışık 1 MW	5000 - 10000

Atomik emisyon spektrumunda ,gözlenen ışığın dalga boyunu ölçerek elementin türü ,her karakteristik dalganın toplam enerjisi ölçülerek analiz edilen elementin miktarı saptanabilmektedir. Deneyisel ilişkilerden yazılabilen

$$I = k.N^m \quad (0.4)a$$

$$\ln I = \ln k + m.\ln N \quad (0.4)b$$

$$m < 1$$

bağıntısı,sayısal spektroskopik analizin temeli olarak alınabilir. Burada I ,elementten yayınlanan ışık şiddeti ,N atom sayısı ,k ve m karakteristik enerji seviyelerine bağlı sabit değerlerdir.

İncelenen madde içinde ,C konsantrasyonundaki elementin dI/dC oranı belirli bir düzeyin altında ise bu element saptanamamaktadır. C ve I değerleri belirli bir düzeyin üstünde ise ışığın absorblanması artacağından ölçümde hata oluşmaktadır. Bunu gidermek için örneğin sulandırılması ,konsantrasyonun ölçüm durumuna göre azaltılması gerekir. Ölçüm de hatayı azaltmak ve standartlık sağlamak üzere ,türü ve miktarı bilinen bir madde analiz edilecekler ile birlikte işleme tabi tutulur. Standart kaynağın ışık şiddeti ile, örneğin I_x ışık şiddeti ve C konsantrasyonu arasında ;

$$\ln \frac{I_x}{I_E} = \ln k + m_x \ln C_x \quad (6.5)$$

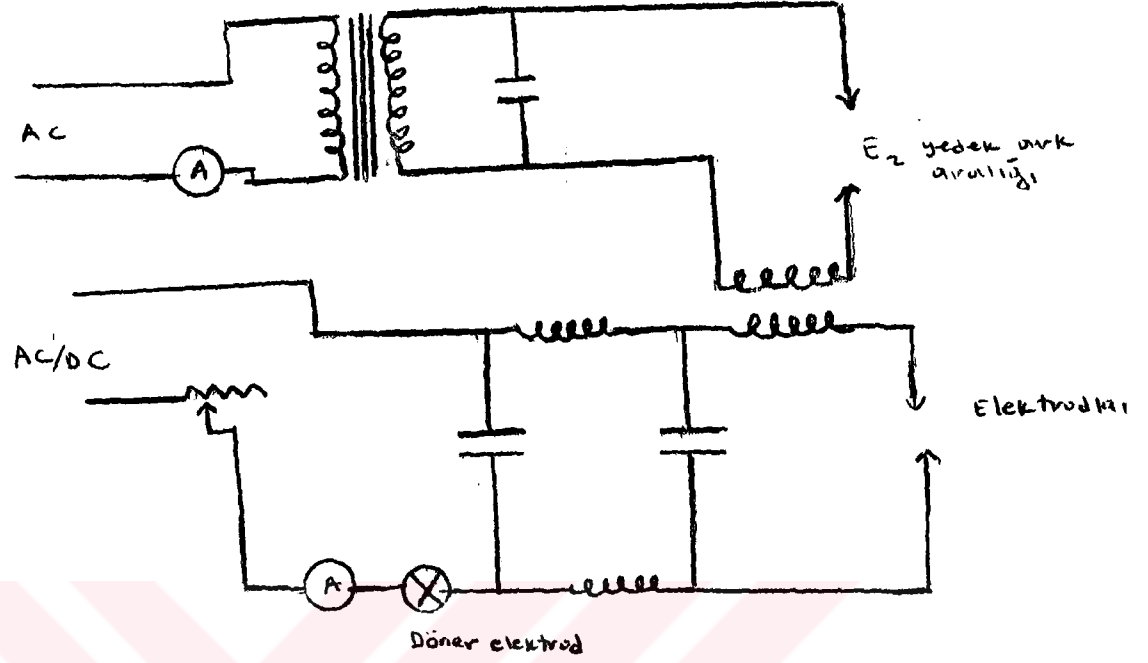
eşitliği ile belirtilen bir bağıntı kurulabilmektedir. $\ln I_x / I_E$ değerini , $\ln C_x$ 'in fonksiyonu olarak alıp grafik çizmek suretiyle ölçümün doğruluğu hakkında karar verilebilmektedir. İdealde grafiğin doğru veya doğruya yakın bir görünümde oluşması beklenir. Ölçümdeki duyarlık ,atomların uyarılma koşullarına ,standart maddenin yapısına ,ışığın dalga yapısına göre değişir. İdeal bir ölçüm için ,standart maddenin ve analiz edilecek maddelerin buharlaşma sıcaklıkları ,saf element veya kimyasal bileşik olma durumuna göre tablo (6.1) de belirtilen enerji kaynaklarının sağlayacağı sıcaklık derecesinden düşük olmalı ve uyarıldıklarında yayınlanan ışık dalga boyları birbirlerine yakın değerde olmamalıdır. Bu durum için tablo (6.2) de bir örnek gruplandırma gösterilmiştir.

Tablo : 6.2 Elektrik Arkında Bazı Maddelerin Buharlaşma Durumu

Madde yapısı	Elementler
Saf element	Hg> As> Cd> Zn> Sb> Mn> Ag, Sn, Cu> Fe, Co, Ni> Mo
Sülfat	As, Hg> Sn> Cd> Sb; Pb> Zn> C> Fe, Cu, Ni, M, Ag>> Mo
Oksit ,sülfat , karbonat ,silikat veya fosfat	As, Hg> Cd> Pb> Ln, Ag, Zn> Cu> Sn> Li, Na, Cs> Mn> Cr, Mo, Fe, Co, Si> Mg> Al, Ca> Ti> Be, Ta

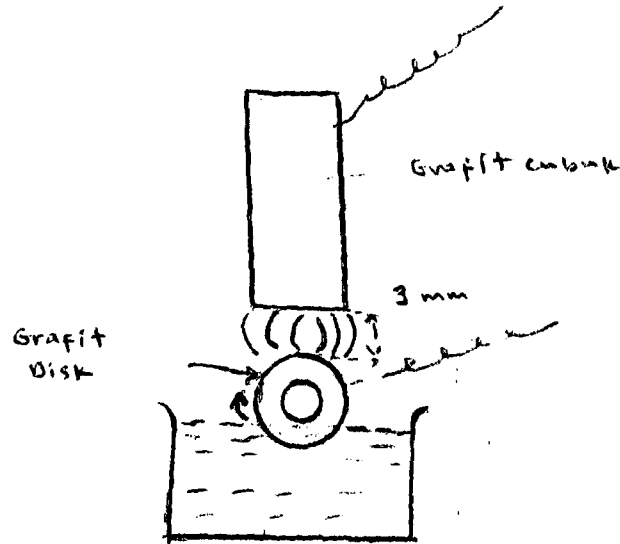
Atomik emisyon spektroskopisinde maddeler ,sıkıştırılmış durumda (metal) ,toz veya çözelti halinde ölçüm ve analize tabi tutulur. Sıkıştırılmış durumda madde ,metal ,alaşım veya toz metalin tablet halinde sıkıştırılması şeklinde olur. Çözelti durumunda analiz ,metal veya alaşımların tozunun thionalide ve tannik asid de çözeltiilmesi ile yapılır.

Bu çalışmada ,elektrik arkı sistemi ile çalışan ,bir atomik emisyon spektrometresi kullanılmıştır. Elektrodların ısınmasını önlemek için ,şekil (6.2) de görülen kesikli ark devresi kullanılarak ,elektrodlara 8 yarım titreşim/saniye frekansında , peak değeri 22 KW olan yüksek voltaj uygulanmıştır.



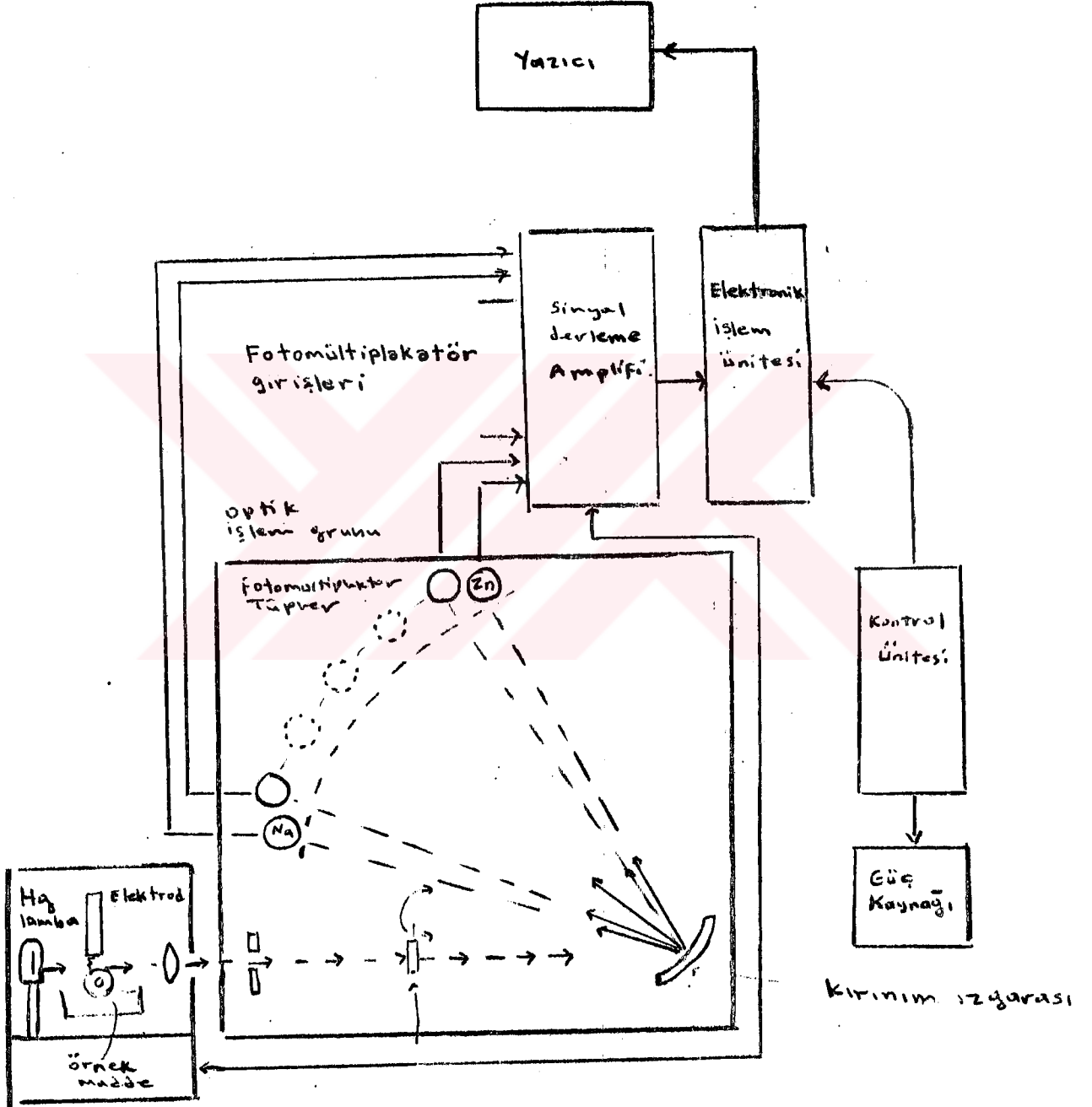
Şekil : 6.2 Kesikli Ark Devresi

Cihazın , 15,3 cm uzunluğunda , 0,62 cm çapında ve 1,24 cm çapında 0,51 cm genişliğinde olan ark elektrodlarının analiz edilecek madde gözeltisi ile birarada ki konumları şekil (6.3) de belirtilmiştir. Disk elektrod kendi etrafında 1/2 titreşim/saniye frekansla , sistemdeki bir motorla döndürülmektedir.



Şekil : 6.3 Madde Analizi için Döner Elektrodlu Ark

İncelenecek maddenin disk elektrod üzerinde ,ateşlemeden itibaren 20-200 milisaniye süren ark ortamında uyarılmasıyla oluşan ışık ,şekil (6.4) de genel diyagramı verilen atomik emisyon spektrometresinin ilgili Unitelerinde değerlendirilir.



Şekil : 6.4 Atomik Emisyon Spektrometresi Blok Diyagramı

Atomik emisyon spektrometresinin ,madde uyarma bölümündeki cıva ışığından ,optik sistemin ayarında referans ışık olarak ve ölçümde standart olarak yararlanılmaktadır. Cıva lamba ,aynı zamanda elektrodların bulunduğu kısmın kapağı açıldığında otomatik olarak yanıp ,elektrodlar bölgesindeki havayı iyonize ederek ark sırasında girişime neden olabilecek istenmeyen gazların ışığının oluşumu önlenmiş olur. Yansıtma levhası elektrodlar arasındaki her yama olayında bir dönüş yapacak şekilde düzenlenmiştir. Kırınım ızgarası çok duyarlı quarztan yapılmış bir içbükey ayna olup ,bir prizma gibi belirli dalga boylarında ışık oluşumunu sağlayıp çıkış yarıklarından fotomultiplikatörlere ışığı gönderir. Fotomultipli - katör tüplerde ışık ,elektrik enerjisine dönüşerek ölçülebilir değerler elde edilir. Emisyon spektrometresiyle 20 kadar element , 0-999 ppm aralığında bir değerde ,saptanabilmektedir. Bu cihazla Fe ,Ag ,Al ,Cr ,Cu , , Na ,Ni ,Pb ,Si ,Sn ,Ti ,B ,Ba ,Cd ,Mg ,Mo ,V ,Zn ,ölçülebilmektedir.

6.1.2 Gamma Spektrometresi

Metal ve alaşımlarda atomik difüzyonu incelemek için ; nötronlar ,gamma ışınları ve yüksek enerjili yüklü taneciklerin , elementlerle reaksiyona girerek onları radyoizotop haline dönüştürmesinden yararlanılabilmektedir. Her radyoizotopun karakteristik özelliklerini belirten ,çekirdek enerji düzeylerinde ki değişim sonucu yayılan radyasyonun ölçümü örnek madde hakkında nitelik ve nicelik yönünde bilgiler verir.

Radyoizotop oluşturulması ;siklotron gibi tanecik hızlandırıcılarında , $AX (d,n)^{A+1}Y$ veya $AX (\alpha,n)^{A+4}Y$ reaksiyonları ile , betatron gibi lineer hızlandırıcılarda $AX (\gamma,n)^{A-1}Y$ reaksiyonu ile ,Deuteron hızlandırıcılarda , $AX (d,n)^{A+1}Y$ reaksiyonu ,reaktörler de hızlı nötronlarla $AX (n,p)^{A-1}Y$, $AX (n,\alpha)^{A-3}Y$ reaksiyonları veya termal nötronlarla $AX (n,\gamma)^{A+1}Y$ reaksiyonları ile gerçekleştirilir. Laboratuvar çalışmalarında yaygın olarak kullanılan izotopik nötron kaynaklarının genel özellikleri tablo (6.3) de belirtilmiştir.

Tablo : 6.3 İzotopik Nötron Kaynakları

reaksiyon	γ ve α yayan izotop	hedef	yarı-ömür	ϕ $n/cm^2/sn$	doz mR/saat
(γ,n)	^{124}Sb	Be	60,4 gün	$1,4.10^6$	980
(α,n)	^{227}Ac	Be	21,8 yıl	$1,5.10^7$	120
(α,n)	^{226}Ra	Be	1602 yıl	$1,3.10^7$	780
(α,n)	^{228}Th	Be	1,9 yıl	2.10^7	600
(α,n)	^{238}Pu	Be	87,7 yıl	$2,2.10^7$	<1,5
(α,n)	^{241}Am	Be	458 yıl	$2,2.10^6$	<2,65
(α,n)	^{242}Cm	Be	163 yıl	$2,5.10^6$	2,5

Tablo (6.3) de ,doz ,1 Ci aktivitedeki bir kaynağın 1 metre uzağındaki radyasyon etkisini göstermektedir. Aktivasyon

analizinde ,ışınlanan maddelerin reaksiyona girmeleri ϕ reaksiyon tesir kesitlerine ; ϕ ışınlayıcı akısına, N_0 hedefteki atom sayısına bağlıdır. Aktivasyon işlemi sonucunda ,hedefte aktiflenen atom sayısı

$$R^+ = \phi . \sigma . N_0 \quad (6.6)$$

olur. Belirli bir t süre sonra ,Üretilen toplam radyoaktif atom sayısı , $R^+ . t$ kadardır. İstenilen radyoaktif atom bir taraftan üretilirken ,bir taraftan da $R^- = \lambda . N^+$ eşitliğine göre bozunup başka elementlere dönüşür. N^+ ,birim cm^3 deki radyoaktif atom sayısını göstermektedir. Eğer yeni radyoaktif atomlar sabit hızda oluşturulursa onların sayısı $R^+ = R^-$ denge durumuna varana kadar artar. Bu duruma kısa ömürlüler daha kısa sürede uzun ömürlüler daha uzun sürede varırlar. Bu nedenle ϕ reaksiyon tesir kesiti yeterince büyük olmayan elementleri gözlemek (aktivitelerini ölçgebilmek) çok zordur. Hedef ,dt süresince ışımlandığında oluşan radyoizotop ,

$$dN_+ = - \lambda N_+ dt \quad (6.7)$$

eşitliği ile veya bu eşitliğe integral işlemi yaparak

$$N_+ = N_0 e^{-\lambda t} \quad (6.8)$$

bağıntısından bulunabilir. Ancak $t=0$ anında N_0 sayıda olabilecek radyoizotop atom diğer taraftan ,radyoizotopun T yarı ömrü ile orantılı olarak bozunarak azalır. İzotopun aktivitesinin yarılanması ;

$$\frac{N_T}{N_0} = \frac{1}{2} = e^{-\lambda T}$$

$$\ln 2 = \lambda T = 0,693$$

$$\lambda = \frac{0,693}{T} \quad (6.9)$$

eşitlikleri ile inceleyerek λ bozunma sabiti ile T yarıömürü arasındaki bağıntıyı bulabiliriz. Aktivasyon analizinde çok önemli bir faktör olan yarı ömür ,ışınlama ve aktivite ölçümünde değerlendirilir.

Radyoizotopların (6.7) eşitliğinde belirtilen oluşumunu takiben ,bozunmaları nedeniyle sahip olacakları A^* aktivitesi

$$A^* = \lambda N^* = \frac{0,693}{T} N_+ \quad (6.10)$$

şeklinde ifade edilebilir. Böylece Üretilen $N_0 . \phi . \sigma$ kadar radyoizotop ile bozunan λN^* radyoizotop aktivitelerinin farkını

ışınlanan dN çekirdek sayısının dt sürede değişimi olarak ,

$$\frac{dN}{dt} = N_0 \sigma \phi - \lambda N \quad (6.11)$$

şeklinde yazıp ,denun integralinden t ışınlama süresi sonunda ,N₀ hedef çekirdekten ,radyoaktif duruma dönüştürülen N çekirdek sayısı

$$N = \frac{N_0 \sigma \phi}{\lambda} [1 - e^{-\lambda t}] \quad (6.12)$$

şeklinde bulunur.

Oluşturulan radyoaktif çekirdeklerin aktivitesi

$$A = \lambda N = N_0 \sigma \phi (1 - e^{-\lambda t}) \quad (6.13)$$

eşitliği ile hesaplanabilir. Hedef çekirdek saf izotop değilse , hedefin içinde ışınlamaya elverişli N₀ çekirdek sayısı

$$N_0 = \frac{W N_A F}{M} \quad (6.14)$$

formülünden bulunur. Burada W ,hedef madde içindeki ışınlanacak izotopun ağırlığını (g) ,N_A ,avagadro sabitini ,F ,ışınlanacak izotopun doğal bolluk yüzdesini ,M ,ışınlanacak izotopun atom ağırlığını göstermektedir.

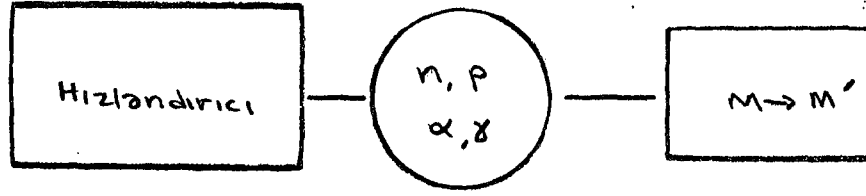
(6.13) ve (6.14) formüllerini birarada yazarak ve A'nın birimini ,bozunma/saniye'den Curie/gram'a , σ' nin birimini , cm²/çekirdek'den barn'a dönüştürerek ,

$$A = \frac{0,693 . \phi \sigma . W F}{3,7 . 10^{10} M} (1 - e^{-\lambda t}) \quad (6.15)$$

şeklinde genel bir formül düzenlenip kullanılabilir. Bu formülde de λ .[T⁻¹] ,t, [T] boyutunda listenen zaman biriminde alınabilir.

Uygulamada ,izotopların ışınlanmalarının süresi ,yeterli düzeyde radyoaktiflik kazanmaları ,en azından aktivitelerinin ölçülebileceği düzeye gelmesi için ,uzun ömürlü radyoizotoplarda yarı ömre yakın veya eşit ,kısa yarı ömürlülerde yarı ömürün birkaç misli fazla olmalıdır. (6.13) eşitliğinde 1-e^{-λt}=1 olacak şekilde t süresi seçilirse N₀σφ saturasyon aktivitesine ulaşılır.

Aktivasyon yöntemi ile madde analizi genel durumu tablo (6.5) de belirtilmiştir. Bu yöntemi uygulamada yararlanılabilecek fiziksel ve kimyasal koşullar ek tablolarla verilmiştir.



ışın

Madde



Radyoizotop ışıması

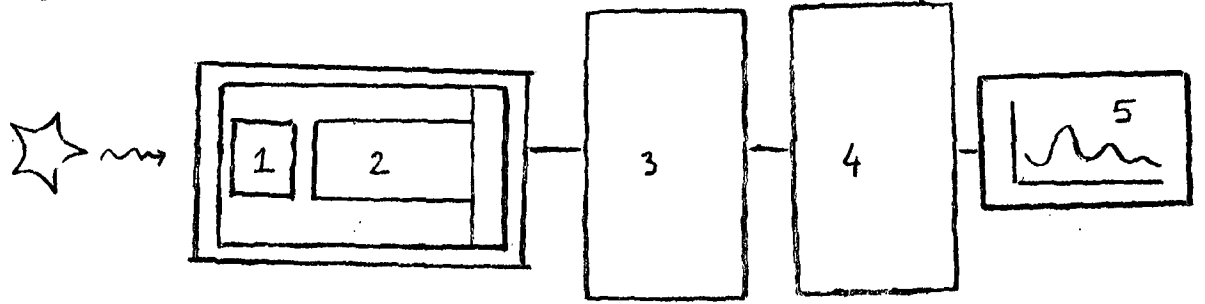
Şekil : 6.5 Aktivasyon Analizi Genel Diyagramı
(M Analiz Edilen Madde ,M' ,Üretilen izotop)

Aktivasyon analizinin ,ışınlamadan sonraki ölçüm işlemleri , doğal radyoaktif maddelerin difüzyonunun analizinde de kullanılabilmektedir. Maddenin radyoaktivitesi ,ışının veya tanecığın gazları iyonlaştırması,kristalleri floresans uyarımı (sintilasyon) ve yarıiletkenlerin elektriksel özelliklerini değiştirmesi gibi olayları değerlendirerek yapılan aletlerle ölçülür.Aktivasyon analizi tekniklerinde genelde kullanılan sintilatör dedektörler , üzerlerine düşen gamma ışınlarının sintilasyon oluşturarak çıkardığı ışığın ,bir fotomultiplikatörde elektrik puls'ına çevrilmesi esasına göre kullanılır. Başlıca sintilatör dedektörler sıvı fosfor ,plastik fosfor ,NaI(Tl) ,Li(Eu) ,CsI(Tl) ,Toz ZnS(Ag) 'dur. Floresan özelliği olmayan maddeler uyarıldıklarında , elektronlarının seviye değiştirip ışık yayınlamaları 10^{-8} saniye veya daha kısa sürede gerçekleşir. Floresan maddelerde atomik enerji düzeylerindeki geçişler mikro saniye veya saatleri bulan sürelerde de gerçekleşebilmekte ,bu olaya fosforesans denilmektedir. Atomik seviye değişim süresi ,organik kristallerde ,inorganik

kristallerde ,asal gazlarda değişik değerler ılmaktadır.[22]

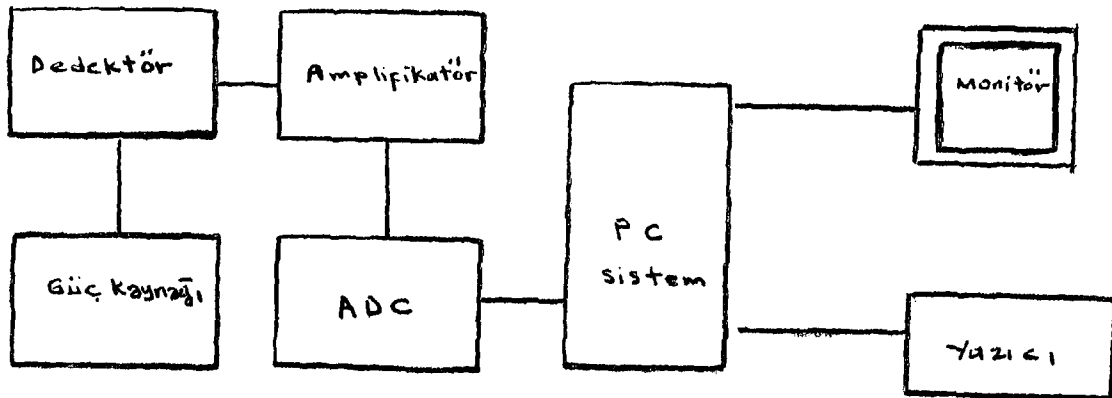
Gamma radyasyonun dedeksiyonunda yaygın olarak NaI(Tl) sintilatör dedektör kullanılmaktadır. Gamma radyasyonun ölçüm ve analizi için şekil (6.6) da görülen spektrometre düzeneği kullanılır.

aktiflenmiş örnek
(γ ışını)



Şekil : 6.6 Sintilasyon Sayacı ve Gamma Spektrometresi
1 - NaI(Tl) sintilatör (3'x3')
2 - Fotomultiplikator 3 - Amplifikator
4 - Puls analizörü 5 - Kayıt

Bu çalışmada ,Cn, γ) reaksiyonuna dayalı radyoaktivasyon ve gamma spektrometresi ile ölçüm ve analiz yapılmıştır. İncelenecek örnekler bir ,Am-Be izotopik nötron kaynağında ısıtılarak γ yayıcısı radyoizotop haline dönüştürülmüş ve şekil (6.7) de görülen çok kanallı ,bilgisayarlı gamma spektrometresi ile incelenmiştir.



Şekil : 6.7 Bilgisayar Kontrollü Çok Kanallı γ Spektrometresi
Blok Diyagramı

Kullanılan γ spektrometresinde ;NaICTID sintilatör dedektör- den alınan elektrik puls'lar ,amplifikatör ,ADC (Canalog-digital çevirici) Uniteler vasıtasıyla ,bilgisayar Ünitesine ulaştırılarak ,buradaki 4048 kanallı analizörde işleme tabi tutulur. Bilgisayar kontrollü γ spektrometresinde ,spektroskopik analiz yazılımı kullanılmıştır. Bu paket program komutları kullanılarak ,difüzyon deneyinde incelenen maddedeki radyoizotopların , γ enerjisi peak değerlerinden türü saptanmış,ve toplam aktiviteleri ölçülmüştür.

6.2 Alüminyum Alaşımlarında Zn ,Cu ,Ag ,Mg ,Co Difüzyonu

Önceki bölümlerde ;metal ve alaşımlarda difüzyonun dayandığı kuramsal temellerin ve deneylerden elde edilen gözlem sonuçlarının değerlendirilmesi yapılmış ,bu çalışmada kullanılacak deney sistemleri ve ölçüm yöntemleri açıklanmıştır. Genel literatür değerlendirmesinden görülmüştür ki ,difüzyon olayı uygulamadaki duruma göre yararlı [23] veya zararlı [24] bir olgu olarak karşımıza çıkmakta olup ,gerçekleşmesi veya önlenmesi ,ortamın sıcaklığına ,metalın ,alaşımın atomik yapısına ,oksijen gibi gazlardan etkilenmesi gibi koşullara bağlı olarak değişmekte ,difüzyonu engelleyici faktör olarak karşılaşılan oksidasyon etkisi yapılan deneysel çalışmaların başlıca problemini oluşturmaktadır.

Bu çalışmada ,Zn ,Cu ,Ag ,Mg ve Co elementlerinin kararlı izotoplarının ve radyoaktif izotoplarının ,alüminyum alaşımlarında yayınımları ,bilinen yöntemlere ve tasarlanan bazı yeni yöntemlere göre incelenmiştir. Bu bölümde uygulanan deney yöntemleri ve koşulları genel olarak açıklandıktan sonra ,herbir örnek için yapılan gözlemler ve değerlendirmesi aşağıdaki bölümlerde verilecektir.

Metal Örneklerin Hazırlanması

Deneylerde kullanılan yagan ve yayılan metal örnekler ,birkâç cm çapında ve uzunluğunda silindirik parçalar halinde kesilip ,difüzyon için kullanılacak yüzeyleri fiziksel ve kimyasal işlemlerle parlatılmıştır. Parlatma işlemlerinde günümüzde endüstride ve laboratuvar deneylerinde kullanılan mekanik ,kimyasal ,aşındırma ,elektromekanik tekniklerin [25] uygulamadaki kuralları göz önünde tutulmuştur. Parlatma işlemi için ,ilk aşamada örnekler ,ayarlanabilir metal taşıma ve parlatma cihazında ,makro düzeyde aşındırılmıştır. İkinci aşamada parçalar ; 10-20 g NaOH 100 ml H₂O bileşimindeki çözelti içinde 60-70 °C sıcaklıkta 5-15 dakika bekletilip ,daha sonra HNO₃ içine kısa süre daldırılıp çıkarılarak istenilen makro yüzey yapısı elde edilmiştir.

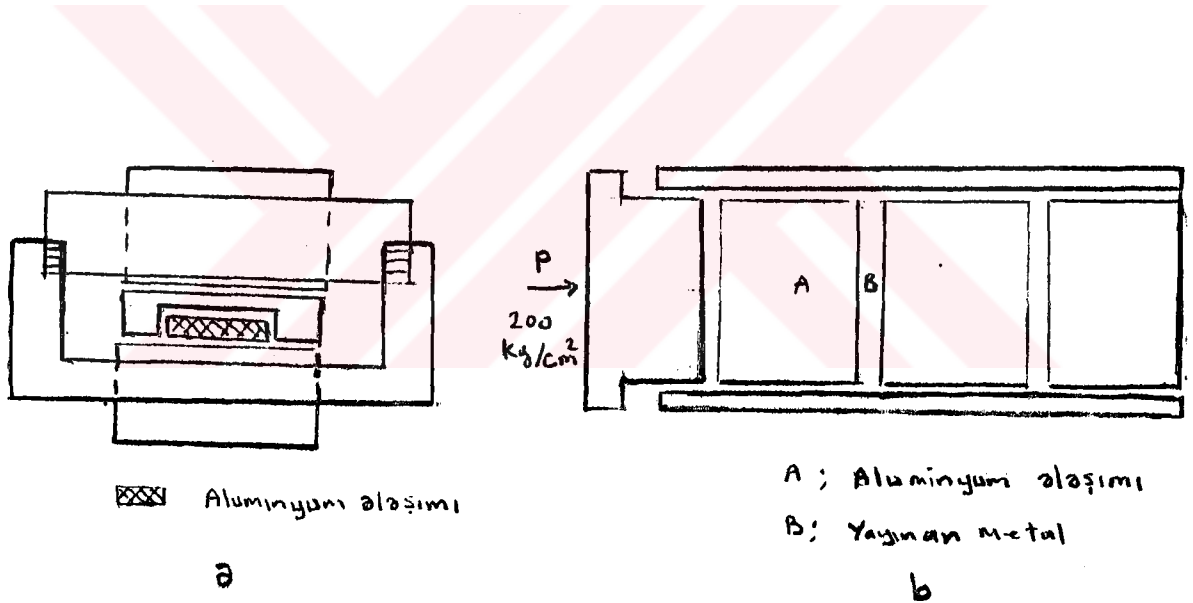
Radyoaktif Metal Örneklerin Hazırlanması

Doğal radyoaktif madde kullanarak veya nükleer reaksiyon sonunda elde edilen radyoizotop kullanarak difüzyon olayını incelemek için alışılâgelen yöntem ,radyoaktif maddeyi ,alüminyum alaşımı ile temas ettirip ısıtılıp işlem yapmak ,daha sonra kesit alma yöntemi ile parçalar alıp radyoaktivitenin değişimini ölçmektir. [18] Diğer bir yöntem ,difüzyon işleminden sonra metal örnekten kesit alma yöntemine göre alınan parçaların radyoaktivitesinin değişimini ölçmektir.[19] Bu çalışmada ,Co-60 in alüminyum

alaşımına yayılımı ısıtma işleminden sonra ,alınan kesitlerin radyoaktivitesi ölçülerek incelenmiş ayrıca Co-59 ,Zn-64 ,Ag-109 izotoplarının alüminyum alaşımına yayılımı ısıtma işlemi sağlayıp , kesitler termal nötronlarla ısıtılarak ,oluşan Co-60 ,Zn-65 , Ag-110 radyoizotoplarının aktivitesi ölçülmüştür.

Yayan ve yayılan Metal Düzenegi ve Oksidasyonun Önlenmesi

Yayan ve yayılan metal yüzeyleri parlatma işleminden sonra , triklorür etilen içerisinde kısa bir süre tutulduktan sonra , bekletilmeden difüzyon kabına aktarılıp ,ısıtma işlem aşamasına geçilmiştir. Metal örneklerin difüzyon kabına yerleştirilmelerinde ,difüzyon yüzeyleri arasında kalabilecek oksijenin oluşturacağı metal oksit tabakasının oluşumunu önlemek için bölüm 6.1 de belirtilen yöntemler yerine ,bu çalışmada ;difüzyon yüzeyleri çevresinde kalabilecek boşluklar yayılan metal tozu ile doldurulmuştur. Bir kısım deneylerde yayılan madde olarak metalin klorla yaptığı bileşikler kullanılarak difüzyon ara yüzeyleride örnek maddenin tozu ile doldurulmuştur. Oluşturulan sistemde ,yayan ve yayılan metal örneklerin birbirine iyice temas etmesi ve oksijenin kalabileceği boşlukların doldurulması için şekil (6.8) de belirtildiği gibi basınç uygulanmıştır.



Şekil : 6.8 Difüzyon Deney Düzenekleri

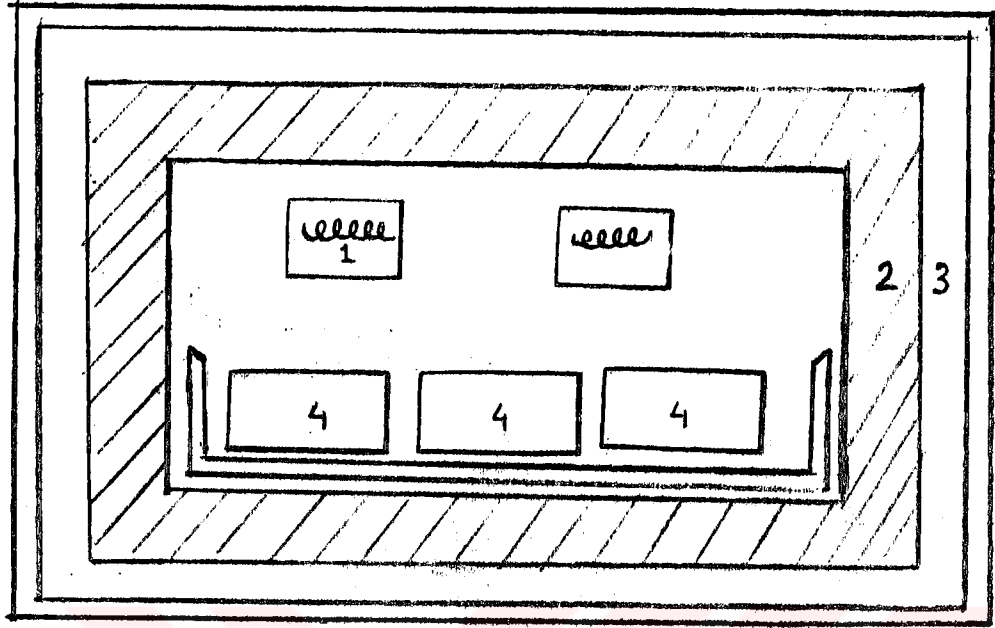
a . Vida ile sıkıştırmalı

b . Basınç makinesi ile sıkıştırmalı

Isıtma işlemi :

Hazırlanan difüzyon düzenegi 100-1500 °C sıcaklık arasında ayarlanabilir . ± 5 °C duyarlılıkta ,termostatlı bir metal eritme fırınına şekil (6.9) da görüldüğü gibi yerleştirilir. Bu fırında , örnekler 8 saat sürekli 400-500 °C arasında sabit bir T sıcaklıkta bekletilip ,fırın kapagi açılmadan ,elektrik güç kaynağı kapatılarak soğumaya terk edilip ,16 saat sonra tekrar ,güç

verilerek T deney sıcaklığında ısıtılmaya devam edilmiştir.



Şekil : 6.9 Metal Eritme Fırını

- | | |
|---------------------------|--------------------|
| 1 - Elektrik ızgarası | 2 - Ateş tuğlası |
| 3 - Isı izolasyon maddesi | 4 - Metal difüzyon |
- Düzenekler;

Örnekten Analiz için Seri Kesitler Alınması

Isıl işlemi tamamlanan örnekler ; ısıtılma kabının vidaları açılarak veya kesilerek çıkarılıp ,mikrotom benzeri elektromekanik makinada döndürülme ve bu esnada ince dişli eğe ile aşındırmak suretiyle difüzyon yüzeyinden talaş alınmıştır. Talaş alma işlemi ile miligram düzeyinde alınan metal toz ,ağız kapalı minyatür plastik tüplere konmuştur. Bu şekilde 10 kesit alınmış ve her kesit alma işleminden sonra ,su düzeli ile aşındırılan yüzey düzlüğü kontrol edilmiştir. Alınan kesitlerin kalınlığı mikro terazide tartılıp sonra kütle ,yoğunluk ve hacim ilişkisi

$$m = d.V = d.\pi .r^2 .h \quad (6.15)$$

ifadesinden hareketle

$$h = \frac{m}{d.\pi .r^2} \quad (6.16)$$

eşitliği ile saptanır. Burada r ,kullanılan ,yayan ,silindir şeklindeki maddenin yarıçapıdır.

Kesitler halinde alınan örnekler ,atomik spektroskopide veya radyoaktif ise gamma spektrometresinde incelenmiştir. Bir kısım kesit örnekler n , γ reaksiyon ile radyoaktif duruma getirildikten sonra γ spektrometresinde analiz edilmiştir.

Ölçümlerin Analizi

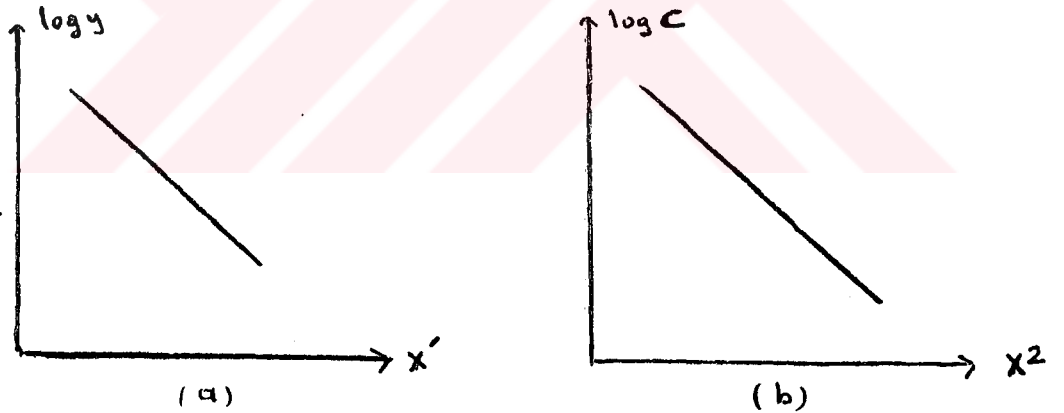
Difüzyon örneklerinin ,atomik emisyon spektroskopisi veya radyoaktif ise γ spektrometresi ile saptanan konsantrasyon veya aktivite değerlerinin difüzyon yol uzunluğu ile değişimi ; regresyon analizi ,Gaus un en küçük kareler yöntemi [20] kullanılarak ,yapılmak suretiyle gözlem sonuçlarına en uygun denklemler kurulmuştur. Bu denklemleri oluşturmak için IBM PC/XT bilgisayarda en küçük kareler yöntemi yazılımından yararlanılmış - tır. Belirlenen denklemlerin

$$y = a.e^{\pm bx'} \quad (6.17)$$

şeklinde ,yarı logaritmik, Ustel denklem şeklinde olduğu görülmüştür. Bu genel bağıntının ;difüzyon denklemlerinin çözümünden elde edilen ,deney koşullarına göre düzenlenmiş (2.50) ve benzeri formlülere uygulanabileceği saptanmıştır. Diğer taraftan (2.50) eşitliğinin yarı logaritmik grafik şeklinde analiz edilebileceği ,6.17) eşitliğinin

$$\log y = \log a \pm b.x' .\log e \quad (6.18)$$

dönüşümüne benzer şekilde düzenleme ile şekil (6.10) da görülen yarı logaritmik grafiğin çizilebileceği görülmüştür.



Şekil : 6.10 Yarı logaritmik grafiklerle analiz

- a - Matematik model denklemin grafiği
- b - Difüzyon denklemin grafiği

Formül (2.50)'yi

$$\log c(x,t) = \log \frac{S}{\sqrt{\pi D_T t}} - \frac{x^2}{4D_T t} \log e \quad (6.19)$$

şeklinde düzenleyip x^2 ' yi x' gibi değerlendirip ,şekil (6.10.b)

grafiğinin m eğiminden ve (6.18) eşitliğinden ;

$$D = - \frac{\log e}{4tm} \quad (6.20.a)$$

$$D = \frac{1}{4tb} \quad (6.20.b)$$

bağıntılarını yazarak ,difüzyon katsayısı hesaplanmıştır.

Gözlem sonuçlarına göre çizilen (6.10.b) tipi grafiklerde , ölçülerin ideal eğri veya doğru grafik üzerine düşmeleri ,diger değişle fonksiyonla değişken arasındaki ilişkiyi belirleyen korelasyon katsayısı [26] bilgisayar ile hesaplanmıştır. Belirlenen r korelasyon katsayısının sıfır olması veya $-1 < r < +1$ aralığı dışına çıkması durumunda fonksiyon ile değişken arasında ilişki olmadığı ,r'nin sıfıra yakın olması durumunda ilişkinin az olduğu ,r'nin işaretinin fonksiyon ile değişken arasındaki ilişkinin yönünü belirlediği gözönüne alınarak incelemeler yapılmıştır.

6.2.1 Çinko Difüzyonu

Çinkonun alüminyum alaşımında yayılımı ;bölüm 6'da belirtilen difüzyon ısıt işlemler düzenekleri ve ölçüm cihazları kullanılarak incelenmiştir. Deneyde kullanılan örnekler ve ölçüm analiz yöntemleri aşağıdaki paragraflarda belirtilmiştir.

Örnek 1 : Zn-Al alaşımı

Bu deneyde ; 3,5cm çapında 0,8 cm kalınlığında silindirik alüminyum alaşımı üzerine 3,5 cm çapında 0,4 cm kalınlığında çinko metal konularak difüzyon olayı incelendi. Difüzyon kabı olarak şekil (6.8.a)'da belirtilen vidalı tip kap kullanılmıştır. Isıt işlemden önce ,Zn parçalar ve Al alaşımı parçalar elektromekanik yöntemle ön parlatma işlemine tabi tutulduktan sonra alüminyum alaşımı bölüm 6.2'de belirtilen kimyasal gözeiti kullanılarak ,Zn plaka ;43 mL H₂O ,27 mL H₂SO₄ ,900 mL saf su karışımı kimyasal gözeiti içinde 30 saniye tutularak parlatma işi tamamlanmıştır. Parlatılan örnekler trikloretilen içinde durulandıktan sonra difüzyon kabına aktarılmıştır. Yayan ,yayılan metal ve difüzyon kabı arasındaki boşluklar Zn metal tozu ile doldurulmuştur. Difüzyon kabına ,vidayı sıkıştırmak suretiyle uygulanan basınçla , oksidasyona neden olabilecek oksijen gazı difüzyon bölgesinden çıkarıldıktan sonra ,şekil (6.9)'da gösterilen fırında ,bölüm 6.2 de açıklandığı 32 saat sürede ;450 °C sıcaklıkta ısıt işleml yapılmıştır. Isıt işlemden sonra bölüm 5.1 de belirtilen kesit alma yöntemi ile alüminyum alaşımı örnekten kesitler alınarak mikrotarazide tartılmış ,(6.16) formülü kullanılarak alınan kesitin kalınlığı hesaplanmıştır. Alınan kesitlerle ilgili ölçüm ve hesaplar tablo (6.3)'de görüldüğü gibi düzenlenerek ,atomik emisyon spektrometresi ile saptanan ölçümlerle birlikte değerlendirilmiştir.

Tablo : 6.3 Çinko Difüzyonu Kesit Analizi

Kesit No	m g	Δx 10^{-3} cm	x 10^{-3} cm	x^2 10^{-6} cm ²	C %
1	0,062	2,387	1,1935	1,424	18,003
2	0,132	5,084	4,929	2,429	15,754
3	0,169	6,509	10,725	1,150	13,981
4	0,183	7,048	17,504	3,083	13,377
5	0,291	11,208	26,032	7,092	11,489
6	0,230	8,858	36,885	1,344	14,357
7	0,261	8,319	45,253	2,047	10,913
8	0,290	11,160	54,997	3,024	7,550
9	0,329	12,671	68,917	4,477	6,450
10	0,285	10,977	78,741	6,200	8,333

Tablo (6.3)'de ;m alınan kesitin kütlesini Δx kesit kalınlığını ,x alınan kesitin ortasından difüzyon yüzeyine olan uzaklığını ,C yayılan elementin (çinkonun) alüminyum ağırlıklı örnek içinde % konsantrasyonunu göstermektedir.

Alınan kesit örneklerin atomik emisyon spektrometresi ile ölçümleri yapılarak tablo (6.4)'deki değerler saptanmıştır. Kullanılan cihazın 999 ppm kadar göstergesi olması ve ölçülen örneğin toz tane büyüklüklerinin farklı olmaları durumundan kaynaklanan değişik ölçümlerdeki hatayı gidermek için ,tablo (6.5) de ,yayılan element ,yayan elementin % ci şeklinde dönüştürme yapılmıştır. Buna göre C konsantrasyon

$$C=100 \frac{C_d}{C_o} \quad (6.21)$$

formülü ile saptanmıştır. Burada ,C_d yayılan elementin ,C_o yayan elementin ppm olarak konsantrasyonunu göstermektedir.

Tablo : 6.4 Atomik Emisyon Spektrometresi ile Örnek Madde içindeki Elementlerin Konsantrasyonu (ppm olarak)

Kesit No	Al	Fe	Cu	Mg	Mo	Zn
1	61,8	5,6	1	3,6	1,5	11,5
2	45,7	4,8	0,9	1,9	2,6	7,2
3	32,9	3,5	0,3	0,9	1,6	4,6
4	29,9	1,1	0,2	0,2	1,8	4
5	23,5	1,8	0,1	0,3	1,9	2,7
6	39,7	1	0,3	1	2,2	5,7
7	39,4	1,3	0,3	1	3	4,3
8	33,1	0,4	0,1	0,4	1,9	2,5
9	24,8	0,3	0,1	0,4	0,8	1,6
10	25,2	0,5	0,1	0,5	1	2,1

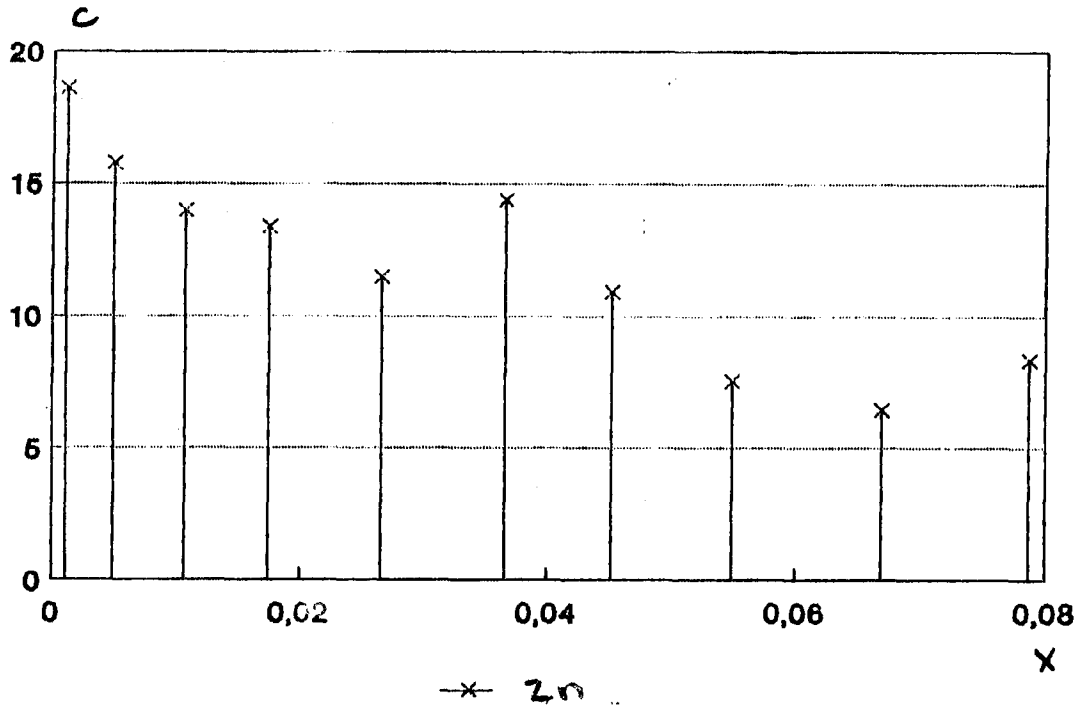
Tablo : 6.5 Yayınan Elementlerin % Konsantrasyonu

Kesit No	Fe	Cu	Mg	Mo	Zn
1	9,061	1,618	5,825	2,427	18,608
2	10,503	1,969	4,157	5,089	15,754
3	10,608	0,911	2,735	4,865	13,981
4	3,676	0,668	0,668	6,020	13,377
5	8,085	0,668	1,276	8,085	11,489
6	2,518	0,755	2,518	5,541	14,357
7	3,299	0,761	2,538	7,614	10,913
8	1,203	0,308	1,208	5,740	7,550
9	1,209	0,403	1,612	3,225	6,450
10	1,984	0,396	1,984	3,968	8,333

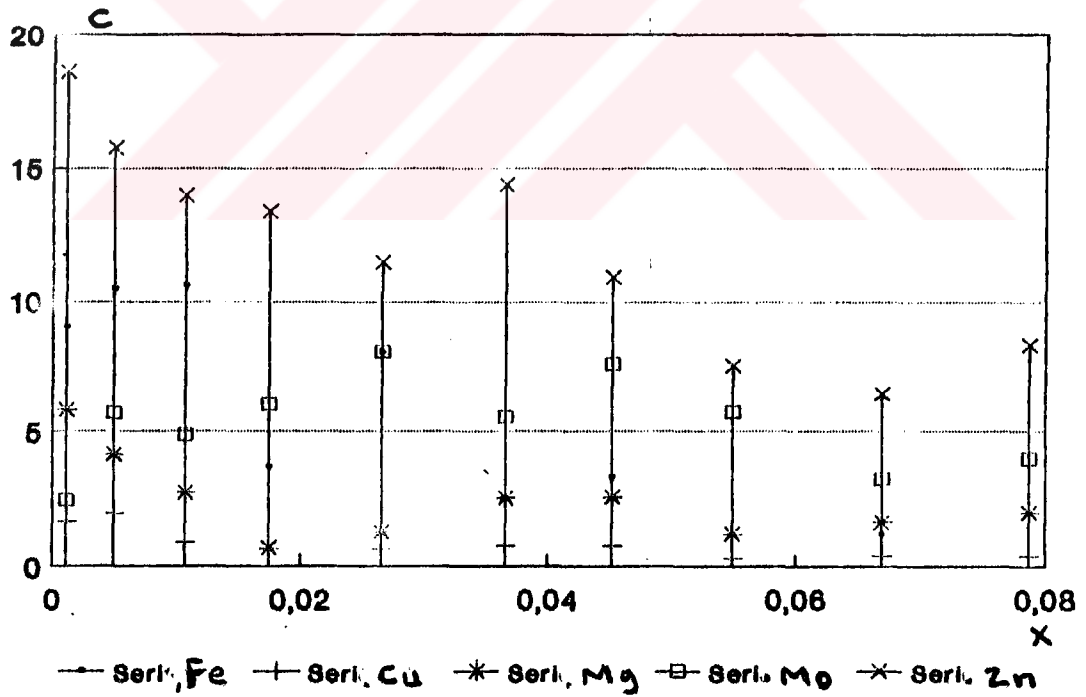
Deneyler sonucunda saptanan değerler kullanılarak $C=F(x)$ grafiklerinin bilgisayarda çizdirilmesi ile elde edilen şekil (6.11) ve (6.12) deki grafiklerden ,C ile x arasında ,

$$y=a.e^{-bx^2} \quad (6.22)$$

bağıntısına benzer bir ilişkinin olacağı anlaşılmıştır.



Şekil : 6.11 Alüminyum Alaşımında Çinko Yayınımı

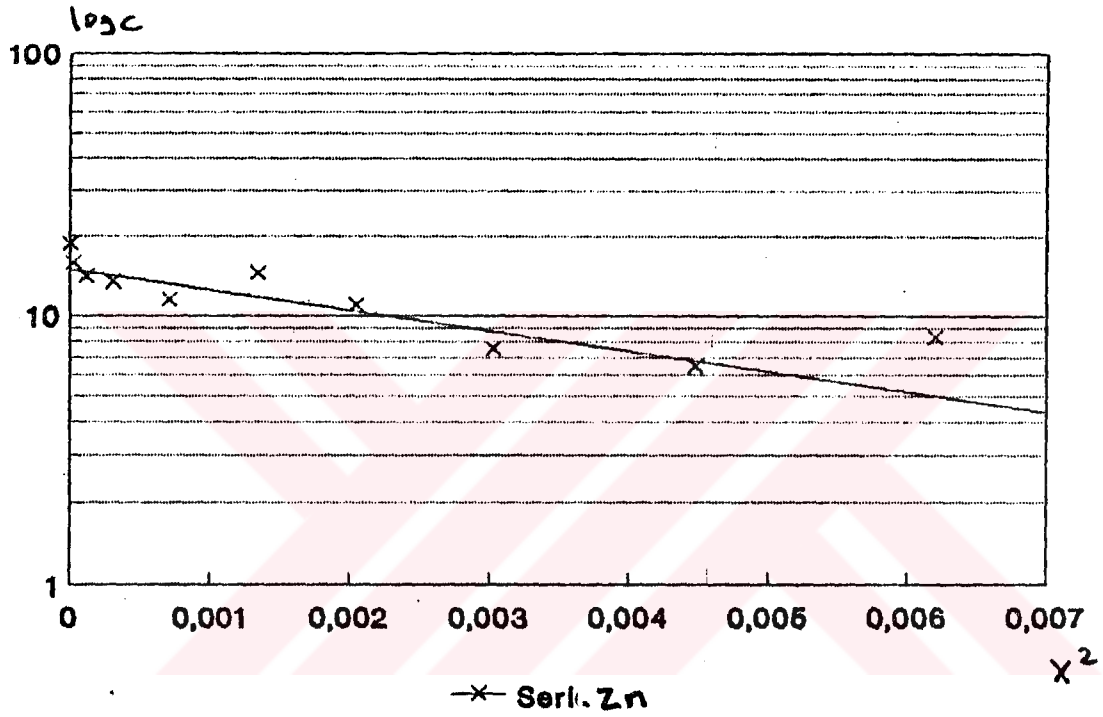


Şekil : 6.12 Alüminyum Alaşımında Zn ve Alaşım Elemanlarının Yayınımı

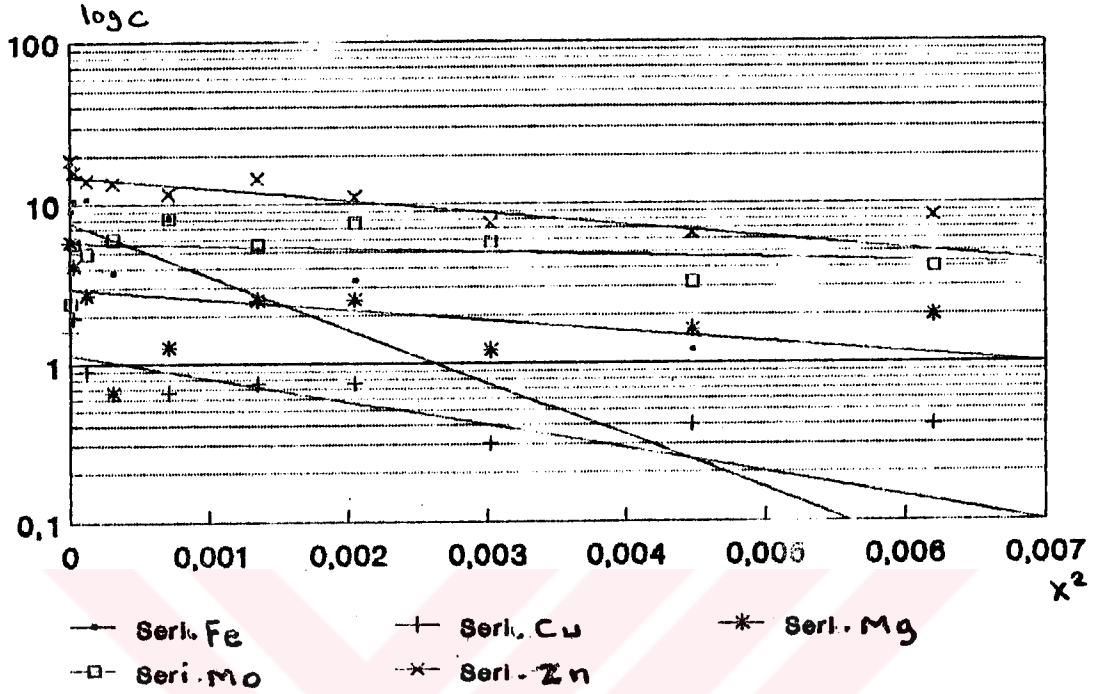
Tasarlanan $y=a.e^{-bx^2}$ benzeri bir denklemin

$$\log y = \log a - b.x^2 . \log e \quad (6.23)$$

şeklinde logaritmik olarak yazılabileceği ve bunun $y=mx+n$ doğru denkleminde benzetilerek $\log y=F(x)$ doğru denkleminin çizilebileceği göz önünde tutularak şekil (6.13) ve (6.14) de görülen $\log C=F(x)$ grafikleri çizilmiştir.



Şekil : 6.13 $C=F(x)$ Grafiğinde Eğim (Çinko için)



Şekil : 6.14 $C=F(x)$ Grafiğinde Eğim (Alaşım Elemanları İçin)

Bu grafiklerde ; grafiğin eğimi ile ,difüzyon hızı arasında (6.20) eşitliğinde belirtilen ,eğimle difüzyon hızı arasındaki ters orantılı durum değerlendirilerek ,

$$M_{Fe} > M_{Cu} > M_{Zn} > M_{Mg} > M_{Mo} \quad (6.24.a)$$

$$D_{Fe} < D_{Cu} < D_{Zn} < D_{Mg} < D_{Mo} \quad (6.24.b)$$

şeklinde ,bir bağıntı elde edilmiştir. Gerçek değerler ile yaklaşık değerler arasındaki farkların karelerinin minimum yapılması esasına dayanan en küçük kareler yöntemi kullanılarak yayınan her element için oluşturulan deneysel difüzyon denklemleri ve korelasyon katsayıları tablo (6.6) da belirtildiği gibi bulunmuştur. Bu difüzyon denklemlerinden ,(6.19) ve (6.20) bağıntıları kullanılarak yayınan her elementin difüzyon hızı hesaplanıp tablo (6.7) de belirtilen değerler saptanmıştır.

Tablo : 6.6 En Küçük Kareler Yöntemi (EKKY) ile Oluşturulan Deneysel Denklemler

Yayılan Element	Deneysel Denklemler	Korelasyon Katsayısı
Zn	$C=14,728 \exp(-136,133 x^2)$	-0,824
Fe	$C=6,898 \exp(-318,950 x^2)$	-0,741
Cu	$C=1,056 \exp(-212,523 x^2)$	-0,658
Mg	$C=2,347 \exp(-70,957 x^2)$	-0,387
Mo	$C=5,401 \exp(-40,306 x^2)$	-0,272

Tablo : 6.7 Alüminyum Alaşımında Zn ve Alaşım Elemanlarının Difüzyon Hızları

Yayılan Element	D $\text{cm}^2 \text{sn}^{-1}$ (Grafikten)	D $\text{cm}^2 \text{sn}^{-1}$ (EKKY ile)
Zn	$0,46 \cdot 10^{-8}$	$1,59 \cdot 10^{-8}$
Fe	$4,54 \cdot 10^{-9}$	$6,80 \cdot 10^{-9}$
Cu	$0,35 \cdot 10^{-8}$	$1,02 \cdot 10^{-8}$
Mg	$2,19 \cdot 10^{-8}$	$3,06 \cdot 10^{-8}$
Mo	$1,13 \cdot 10^{-8}$	$5,38 \cdot 10^{-8}$

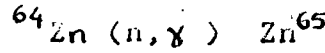
Çinkonun alüminyum alaşımındaki yayılımını incelemek üzere yapılan deneyler sonucunda 450 °C sıcaklıkta difüzyon hızının $1,59 \cdot 10^{-8} \text{ cm}^2 \text{sn}^{-1}$ olduğu saptanmıştır [27]. Alaşım yapısındaki elementler kirkendal olayı [7] nedeniyle yüzeye doğru yayılmalarında incelenmesi neticesinde, tablo (6.7) de belirtilen değerler saptanmıştır. Bu tabloda görüldüğü gibi alaşım yapısında ki atomların birbirini etkilemeleri ve bölüm (3.4) de belirtilen difüzyon faktörlerinin etkisiyle, difüzyon hızları, bu elementlerin saf alüminyumdaki difüzyon hızlarından büyüktür [9] [28]. Alaşım yapısındaki elementlerin difüzyon hızlarının büyüklükleri arasındaki (6.24) bağıntısı ile belirtilen ilişkinin literatürde [15] belirlenen sonuçlarla uyum içinde olduğu görülmüştür.

Deneyde kullanılan alüminyum alaşımının yapısında bulunan başlıca elementlerin, alüminyum elementine oranını saptamak için, tablo (6.5) de belirtilen, onuncu kesite ait ölçümlerden yararlanılmıştır. Bu çalışmada kristal yapının gözlenmemesi nedeniyle, alaşımın katkı elementlerinin çeşidine göre değişen kristal yapıları inceleme dışında tutulmuştur.

Örnek 2. Zn-Al Alaşımı (Al-Zn-Mg-Cu)

Bu örnekte; difüzyon, aktivasyon analizi tekniği kullanılarak incelenmiştir. Bu tekniğin genelde uygulanması n, γ , reaksiyonu ile oluşturulan radyoizotopların yayılan maddeye temas ettirilerek ısıtıl işlem yapılması [15] [29] yöntemlerinden farklı olarak, Zn-64

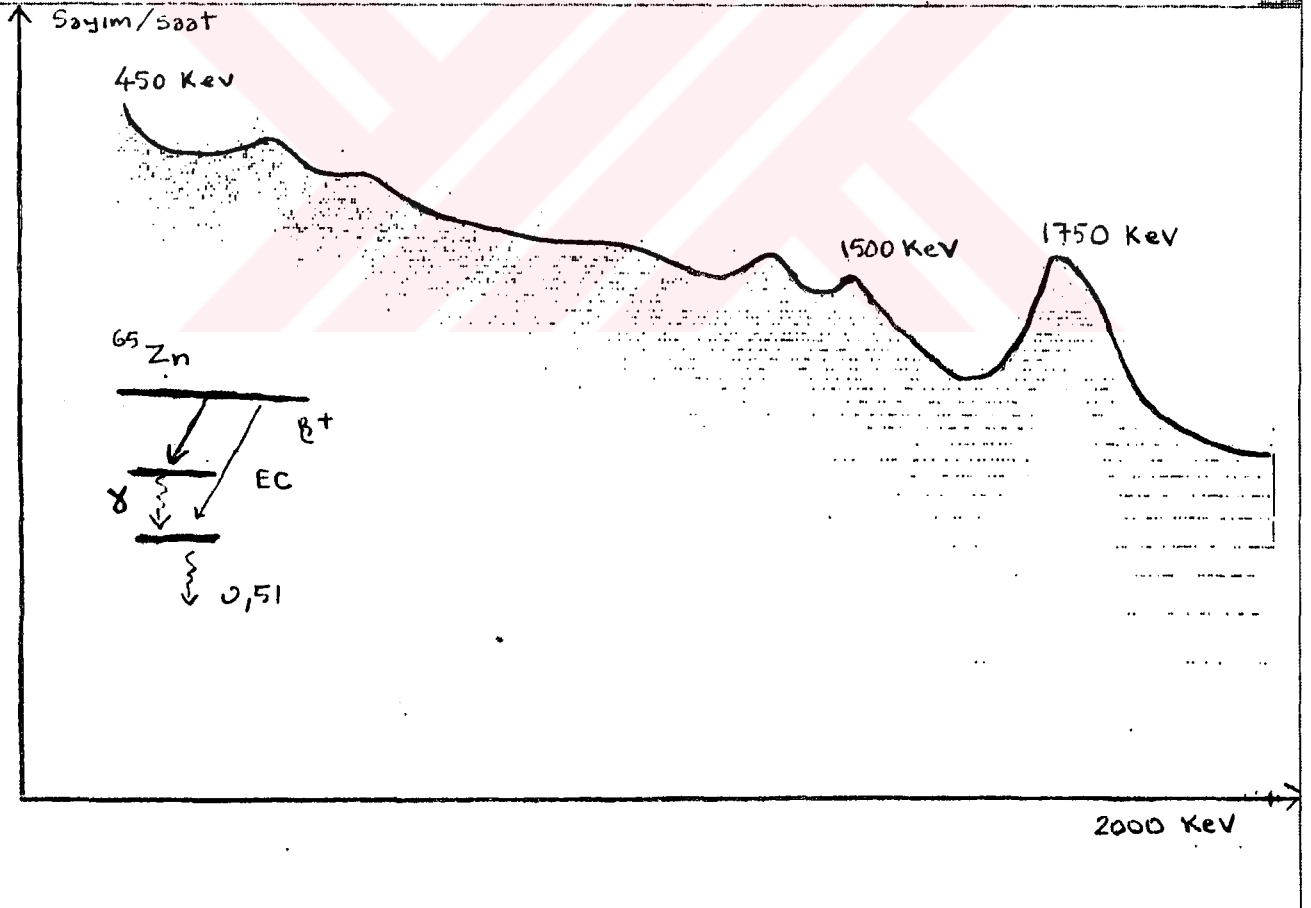
kararlı izotopun ,Aluminyum alaşımına yaygını ısıt ışılemlle sağlanıp ,alınan kesitler termal nötronlarla ışınlanarak radyoaktif Zn-65 izotopu oluşturulmuştur. Difüzyon bölgesinden alınan kesitlerdeki Zn-65 konsantrasyonu gamma spektrometresi kullanılarak analiz edilmiştir. Aktivasyon analizi telnığının ,bu deneyde kullanımında ,bölüm (6.12) de belirtilen esaslara göre hareket edilmiştir. Işınlama için Pa-Be termal nötron kaynağı kullanılarak



reaksiyonu gerçekleştirilmiştir. Deneyde kullanılan nötron kaynağının , $10^4 - 10^7 \text{ cm}^2/\text{sn}$ arasında olan akısının ,aktivasyon için düşük degerde olmasından dolayı ışınlama süresi uzun tutulmuştur. Örnek maddeden alınan kesitler ,minyatür plastik tüpler içinde onlu gruplar halinde plastik tüplere yerleştirilerek ,nötron kaynağının ışınlama bölmelerinde 180 gün ışılandırılmıştır.

Işınlanan kesit örnekler ,şekil (6.7) de blok diyagramı görülen ,çok kanallı gamma spektrometresinde analiz edilmiştir. Işınlama bölmelerinde üst üste konunda ,nötron akısına farklı uzaklıkta olan örnek kesitlerin ,homojen olmayan bir akıda ışınlamaları nedeniyle ,kesitlerin radyoaktivitesi rastgele dağılım göstermiştir. Bu nedenle kuramsal temeller ve deneyde saptanan ölçümler birarada değerlendirilerek şekil (6.15) ve tablo (6.8) de görülen ölçüm değerlendirmeler yapılmıştır.

İlk Kesit : 8610 sayım/saat

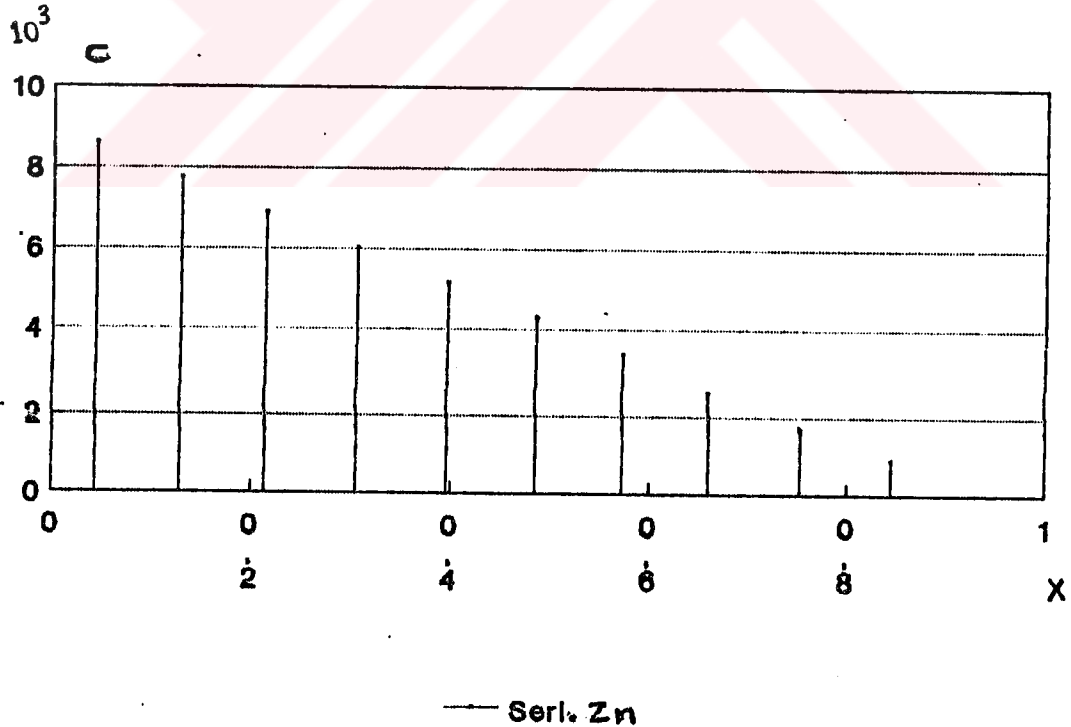


Şekil : 6.15 Zn-65 Gamma Spektrumu.

Tablo : 6.8 Aktivasyon Analizi Tekniği ile Ğinko Difüzyonun İncelenmesi (T=365 °C ,t=30 saat)

Kesit No	m g	Δx 10 ⁻³ cm	x cm	x^2 cm ²	C sayım/saat
1	0,348	8,809	0,0440	0,001939	8610
2	0,319	8,075	0,1284	0,01649	7749
3	0,357	9,037	0,2139	0,04578	6888
4	0,361	9,139	0,3048	0,09292	6027
5	0,359	9,088	0,3959	0,156	5166
6	0,351	8,885	0,4857	0,235	4305
7	0,335	8,480	0,5726	0,327	3444
8	0,364	9,214	0,6610	0,436	2583
9	0,360	9,113	0,7527	0,566	1722
10	0,363	9,189	0,8442	0,712	861
					47355

Tablo (6.8) de belirtilen c radyoaktivite sayımı ,şekil (6.15) de görülen ilk kesitin radyoaktivitesi olan 8610 sayım/saat değerini $C/C_0 = 0,9..... C/C_0 = 0,1$ bağıntılarında kullanılarak bulunmuştur. İdealize edilmiş bu durum oksidasyon etkisinde olmayacağı sabit sıcaklıktaki bir koşulda şekil (6.6) da görülen kararlı difüzyon grafiğini vermektedir.



Şekil : 6.16 Alüminyum Alaşımda Zn Difüzyonu $C=F(x)$ Grafiği

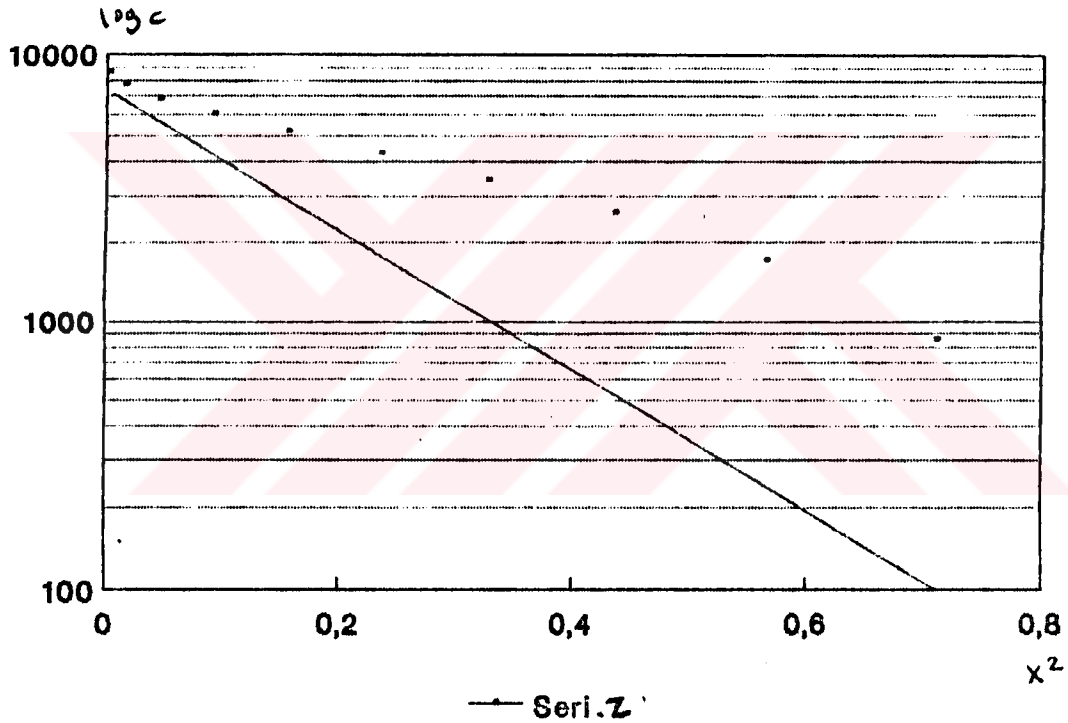
Tablo (6.8) de belirtilen çinko konsantrasyonu ve yayınma uzaklığı değerleri en küçük kareler yönteminde kullanılarak yarı deneysel difüzyon denklemi ;

$$c=8390,384 \exp(-2,959702 x^2) \quad (6.25)$$

şeklinde ve korelasyon katsayısı $-0,9675$ olarak saptanmıştır. Difüzyon denkleminin $\log c=F(x)$ grafiğinin şekil (6.7) de görülen eğimini veya (6.25) denkleminin

$$\log c = \log 8390,384 - 2,959702 \log e x^2$$

şeklinde düzenlenerek belirlenen eğim değerini (6.20) bağıntısında kullanarak $D=7,82.10^{-7} \text{ cm}^2 \text{ sn}^{-1}$ difüzyon hızı bulunmuştur.



Şekil : 6.17 $\log c=F(x^2)$ Grafiği (Çinko Örnek 2)

Aynı katkı maddelerine sahip uç ,dört ve beşinci çinko örnekler içinde benzer yöntemler uygulanarak tablo (6.9) daki değerler elde edilmiştir.

Tablo : 6.9 Alüminyum Alaşımında Çinko Difüzyon Hızı (Aktivasyon Analizi Tekniği)

Örnek no	Deneysel Difüzyon Denklemi	D (cm ² sn ⁻¹)
2	8390,38 exp(-2,959 x ²)	7,8.10 ⁻⁷
3	9327,977 exp(-45,991 x ²)	5,03.10 ⁻⁸
4	8929,814 exp(-21,202 x ²)	1,09.10 ⁻⁷

Aktivasyon analizi tekniği ile çinkonun alüminyum alaşımında yayılımını incelerken homojen olmayan nötron akısının doğuracağı hatalar ,tablo (6.8) de belirtilen yaklaşımlar ve tablo (6.9) da görülen en küçük kareler yöntemi ile giderilmeye çalışılmış Uç örnek üzerinde yapılan gözlemlerden difüzyon sabiti ,ortalama 2,8.10⁻⁸ cm² sn⁻¹ olarak bulunmuştur.

Nötron akısının ,ışınlanan izotoplara homojen akıda düşürülemeyişinden kaynaklanan hatayı azaltmak için yukarıda açıklanan ,teorik ve deneysel uygulamaların tutarlılığını ,(6.15) aktivasyon formülü ve ,bölüm (2.2.1) de belirtilen Fick'in birinci difüzyon denklemini kullanarak aşağıda belirtilen incelemeler yapılmıştır. Aktivasyon formülünü kullanarak ,Zn-64 izotopunun , termal nötronlarla ışınlaması neticesinde kazandığı radyoaktivite

$$A = \frac{0,6023 \cdot \phi \cdot \sigma \cdot W \cdot F}{M} \left(1 - e^{-\frac{0,693 t}{T}} \right)$$

formülünde değerler yerine koyulup ,hesaplama yapılarak tablo (6.10) da görülen neticeler elde edilmiştir. Bu hesaplamalarda W=1 gr ,F=48,89 ,M=64 ,t=180 gün ,T =245 gün ,σ=0,5 barn olarak alınmıştır.

Tablo : 6.10 Nötron Aktivasyon Tekniği ile Elde Edilen Çinko İzotopunun Radyoaktivitesi

	Örnek n°	Kütle gr	Teorik n/cm ² sn				Deneyisel A _d sayım/sn
			10 ⁴	A ₊ bozunma/ sn 10 ⁵	10 ⁶	10 ⁷	
Teorik		1	0,0917	0,9178	9,178	91,78	-
Deneyisel	2	26,058	2,39	2,39	2,39	2,39	2,39
		2,6058					
		0,2605					
		0,0260					
	3	26,585	2,44	2,44	2,44	2,44	2,44
		2,6585					
		0,2658					
		0,0265					
	4	27,892	2,56	2,56	2,56	2,56	2,56
		2,7892					
		0,2789					
		0,0278					

Tablo (6.10) da ,her örneğin ,çok kanallı gamma spektrometrelerinde ölçülen radyoaktivitesi ,10⁴ -10⁷ n/cm² sn gibi nötron kaynağında 1 gr Zn-64'ün ışınlanması durumunda oluşacak radyoizotopun aktivitesi ile karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma

$$m = \frac{A_d}{A_+} \quad (C.2C)$$

bağıntısı ile yapılmıştır. Böylece nötron akısına göre,A sayım/sn aktivite kazanabilecek m kütle miktarı belirlenmiştir. Buna göre ikinci örneğin 10 kesitinin toplam 3,517 gr olan Zn+Al alaşımı tozu içinde ortalama 10 x 0,026058 = 0,26058 gr Zn-65 izotopu bulunabileceği ,bu değerler arasındaki orantıdan ,çinko atomlarının her kesitte ortalama % 7,4 oranında olabileceği anlaşılmıştır. Diğer taraftan 10 kesitin yaklaşık 13,154 sayım/sn olan toplam aktivesinden ,10⁷ n/cm² sn akısındaki referans değeri kullanılarak , 0,1433 gr çinkonun ,örnek içinde % 4 oranında olabileceği anlaşılmıştır. İlk kesitte çinko tozunun yüzeyde ve yayılmış olarak fazla miktarda olması ,örnek içindeki ortalama miktarını yükseltmektedir. Belirlenen bu değerler ,birinci difüzyon denklemi ve en küçük kareler yöntemi ile elde edilen deneyel denklemlerde kullanarak ,difüzyonun kararlı olup olmadığı aşağıda belirlenen şekilde incelenmiştir.

Deneyisel bir yaklaşım olarak çinko örnekleri için kabul edilen kararlı difüzyon durumu gözönünde tutularak bölüm (2.2.1)

de belirtilen birinci difüzyon denkleminde ,

$$C = - \frac{J}{D}x + C_0 \quad (6.26.a)$$

$$m = JAt \quad (6.26.b)$$

bağıntıları yazılabilmektedir. Şekil (6.16) da bir doğru denkleminin grafiğine benzer çizilen Zn-2 örneğin ,en küçük kareler yöntemi ile oluşturulan

$$C = - 96,313x + 9405,24 \quad (6.27)$$

doğru denklemini ;(6.26) eşitlikleri ile karşılaştırıp ve tablo (6.9) da belirtilen ortalama difüzyon katsayısı $1,97.10^{-8} \text{ cm}^2 \text{ sn}^{-1}$ alınmak suretiyle $J/D = -96,313$ 'den kütle akısı $J = 189736.10^{-8} \text{ gr/cm}^2 \text{ sn}^{-1}$ ve $m = JAt$ 'den ,yayınan toplam kütle , $m = 189736.10^{-8} .1,463.108000 = 2,9.10^{-3} \text{ gr}$ değerinde bulunur. Diğer çinko örneklerinde de benzer değerler elde edilmesinden ,bu deney koşullarında yayınının kararsız olduğu sonucuna varılmış ,tablo (6.9) ve (6.10) da belirtilen ,ikinci difüzyon denkleminin ve aktivasyon formülünün teorik varsayım ve mevcut deney koşulları birarada değerlendirilerek ,uygulamasından elde edilen sonuçların geçerli olduğu anlaşılmıştır.

6.2.2 Bakır Difüzyonu

Bakırın ;yapısında % 1,39 Fe ,% 0,30 Cu ,% 2,82 Mg ,% 3,13 Mo ,% 1,48 Zn olan Alüminyum alaşımında yayınımlı kesit alma yöntemi ile incelenmiştir. Deney düzeneği şekil (6.8.a) tipinde hazırlanıp ,bölüm (6.2) de belirtilen işlemler yapılarak ,difüzyon olayı , 350°C sıcaklıkta 152 saatte gerçekleştirilmiştir. Yayınan madde olarak , 3,37 cm çapında , 0,5 cm kalınlığında Cu plaka ve birkaç gram Cu tozu ile kesit alanı $8,915 \text{ cm}^2$ olan 3 cm kalınlığında Alüminyum alaşım disk kullanılmıştır. Isıl işlemden sonra difüzyon yüzeyinden alınan kesitler mikro terazide tartılmış ve atomik emisyon spektrometresi ile örnekteki elementlerin miktarı ölçülerek tablo (6.11) ve (6.12) de belirtilen değerler elde edilmiştir.

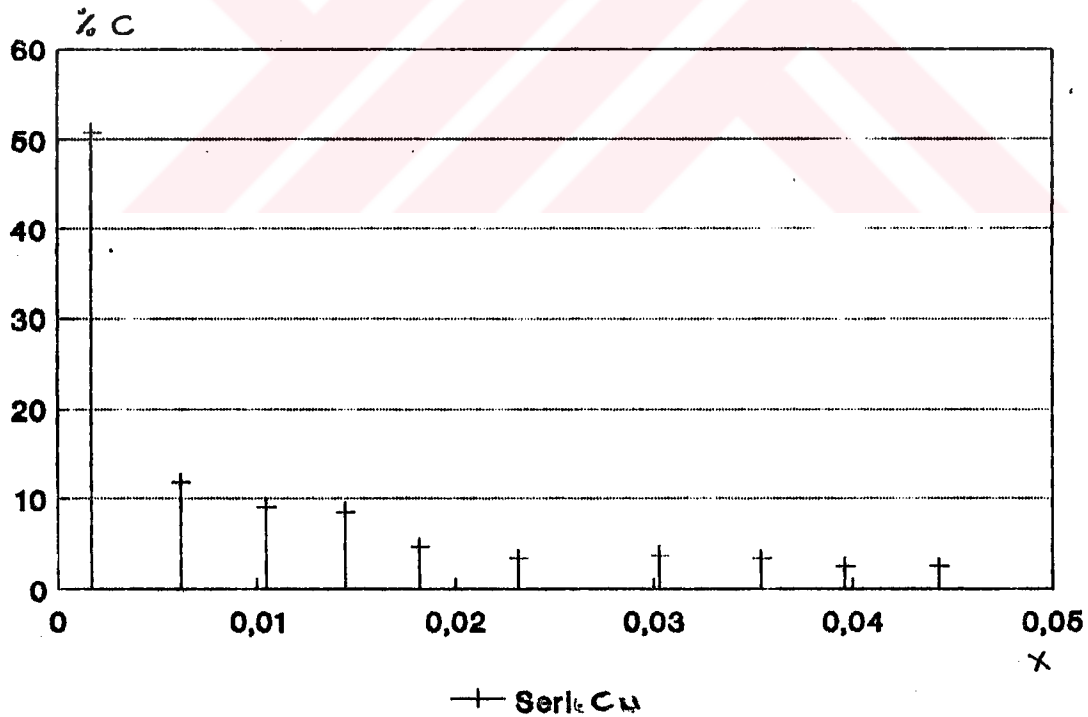
Tablo : 6.11 Bakır Difüzyonu Kesit Analizi

Kütle No	m g	Δx 10^{-3} cm	x 10^{-3} cm	C %
1	0,034	3,489	1,74	50,81
2	0,133	5,525	6,25	11,79
3	0,075	3,115	10,57	9,10
4	0,117	4,860	14,55	8,52
5	0,061	2,534	18,25	4,70
6	0,081	7,519	23,28	3,51
7	0,157	6,522	30,30	3,79
8	0,090	3,739	35,43	3,38
9	0,114	4,736	39,66	2,62
10	0,112	4,652	44,36	2,46

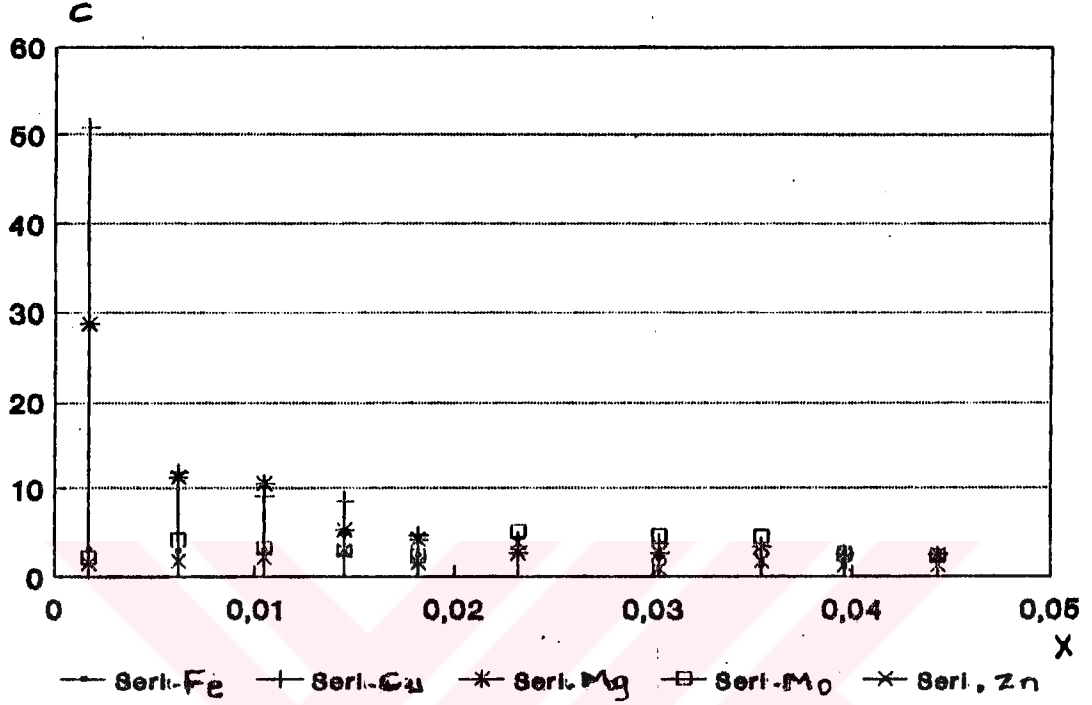
Tablo : 6.12 Bakır-Aluminyum Alaşımı Difüzyon Örneğinde ,
Elementlerin Konsantrasyonu

Kesit No	Al ppm	Fe ppm	%	Cu ppm	%	Mg ppm	%	Mo ppm	%	Zn ppm	%
1	238,7	7,3	3,05	121,3	50,81	66,5	28,69	5,1	2,13	3,6	1,50
2	89,9	2,6	2,82	10,6	11,79	10,1	11,23	3,7	4,11	1,6	1,77
3	50,5	1,5	2,97	4,6	9,10	5,3	10,55	1,6	3,16	1,1	2,17
4	39,9	1,9	4,76	3,4	8,52	2,1	5,26	1,2	3	1,2	3
5	57,5	1,4	2,43	2,7	4,69	2,4	4,17	1,3	2,26	0,9	1,56
6	25,6	1,1	4,29	0,9	3,51	0,7	2,73	1,3	5,07	1	3,9
7	65,9	1,4	2,12	2,5	3,79	1,8	2,73	3	4,55	0,6	0,91
8	44,3	0,6	1,35	1,5	3,38	1	3,38	2	4,51	0,9	1,30
9	45,6	0,5	1,09	1,2	2,62	1,1	2,62	1,2	2,62	0,6	1,31
10	52,7	0,9	1,70	1,3	2,46	1,2	2,46	1,2	2,27	0,7	1,32

Tablo (6.11) ve (6.12) de ,yayınan elementlerin % konsantrasyonu (6.21) eşitliği kullanılarak saptanmış ve bu tablolarındaki değerler kullanılarak ,şekil (6.18) ve (6.19) da görülen ,yayılan elementlerin konsantrasyonun ,difüzyon yol uzunluğuna göre değişim grafikleri çizilmiştir.



Şekil : 6.18 Bakırın Al Alaşımı Yüzeyinden İçine Yayınımı

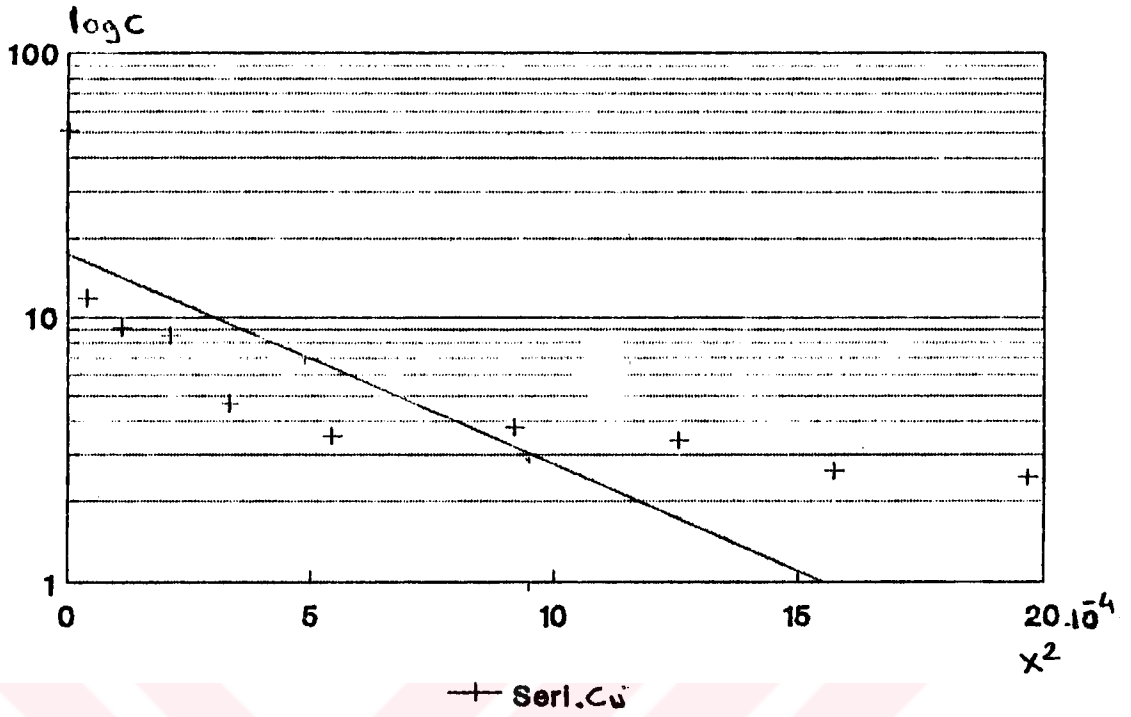


Şekil : 6.19 Alüminyum Alaşımında Elementlerin Yüze Doğru Yayınimleri (Örnek.5)

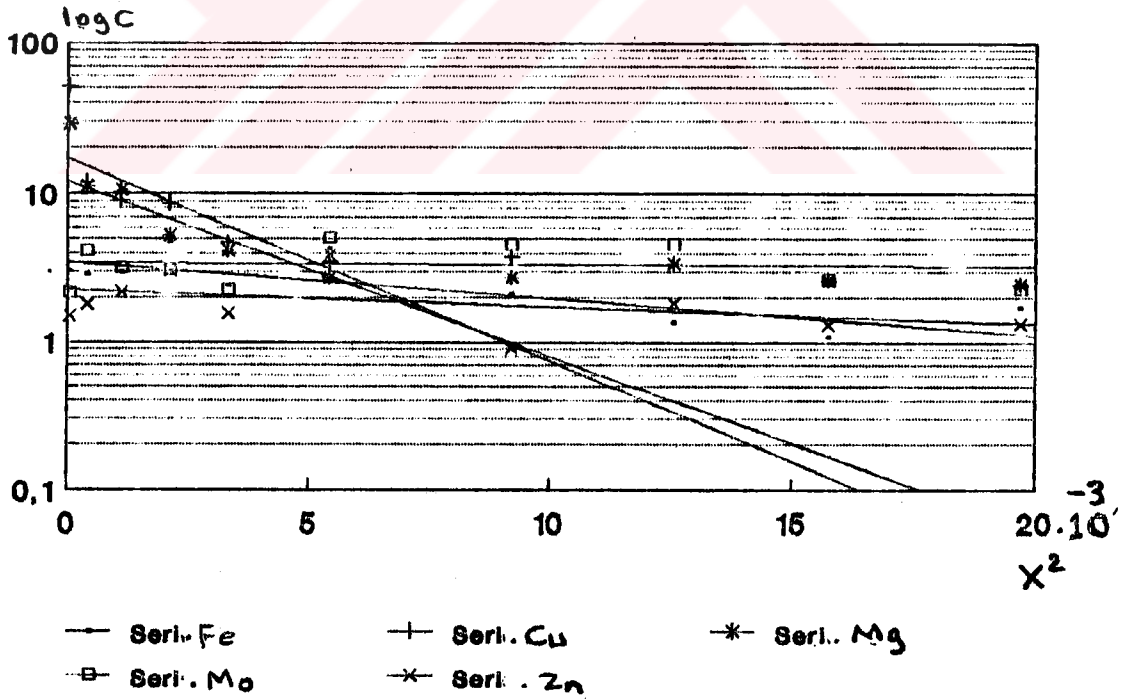
Şekil (6.18) ve (6.19) da görülen grafiklerden bakırın difüzyonunun exponansiyel olarak gözönüne alınarak ,şekil (6.20) ve (6.21) de belirtilen ve enküçük kareler yöntemi ile

$$C = 3,496427 \exp(-526,7012 x^2) \quad (6.28)$$

deneysel difüzyon denklemleri bulunmuştur.



Şekil : 6.20 Cu Difüzyonu $\log c=F(x^2)$ Grafiği



Şekil : 6.21 Al Alaşımında Alaşım Elemanlarının Yayınımının $\log c=F(x^2)$ Grafiği

Bakırın bu deneyde kullanılan Alüminyum alaşımı içine yayılımı ve alaşım elemanlarının yüzeye doğru yayılmalarını analiz etmek üzere en küçük kareler yöntemi ile oluşturulan deneysel difüzyon denklemlerinden ve deney sonuçlarına göre çizilmiş logaritmik grafiklerin eğiminden yararlanarak saptanan difüzyon katsayıları hesaplanarak tablo (6.13) ve (6.14) de belirtilen sonuçlar elde edilmiştir.

Tablo : 6.13 En Küçük Kareler Yöntemi ile Oluşturulan Deneysel Denklemler

Yayılan Element	Deneysel Denklemler	Korelasyon Katsayısı
Cu	$C = 12,194 \exp(-1012,331 x^2)$	- 0,503
Fe	$C = 3,498 \exp(-528,701 x^2)$	- 0,697
Mg	$C = 9,427 \exp(-879,729 x^2)$	- 0,583
Mo	$C = 3,283 \exp(-30,866 x^2)$	0,050
Zn	$C = 2,114 \exp(-253,558 x^2)$	0,363

Tablo : 6.14 Alüminyum Alaşımında Cu ve Alaşım Elemanlarının Difüzyon Hızları

Yayılan Element	$D \text{ cm}^2 \text{ sn}^{-1}$ (Grafikten)	$D \text{ cm}^2 \text{ sn}^{-1}$ (EKKY ile)
Cu	$1,51.10^{-10}$	$4,51.10^{-10}$
Fe	$0,23.10^{-10}$	$8,67.10^{-10}$
Mg	$2,42.10^{-10}$	$5,19.10^{-10}$
Mo	$5,93.10^{-10}$	$1,48.10^{-8}$
Zn	$2,63.10^{-10}$	$1,60.10^{-9}$

Saf alüminyum ve alüminyum alaşımlarında bakırın difüzyonu birçok araştırmacı tarafından incelenmiş olup, genelde ;saf alüminyumda ,bakırın difüzyon hızı ,350-652 °C sıcaklıkta $3,49.10^{-12}$ - $6,09.10^{-11} \text{ cm}^2 \text{ sn}^{-1}$ aralığında değiştiği [1] ,% 0,1 -20 oranında Cu içeren ikili alüminyum alaşımında ;400-640 °C sıcaklık aralığında bakır difüzyon hızının $8,94.10^{-12}$ - $13,8.10^{-10} \text{ cm}^2 \text{ sn}^{-1}$ olduğu [31] saptanmıştır. Bu çalışmada 350 °C sıcaklıkta ,diğer alaşım elemanları yanısıra % 0,3 bakır içeren dördütlü alüminyum alaşımında ,yüzeye kaplanan elektrolitik bakır kutlesinden yayılan bakırın difüzyon hızı $4,51.10^{-10} \text{ cm}^2 \text{ sn}^{-1}$ olarak bulunmuş ,ayrıca alaşım elemanlarının kirkendall kuralına uygun olarak yüzeye doğru bir konsantrasyon gradyanı oluşturdıkları saptanmıştır.

6.2.3 Gümüşün Difüzyonu

Bu deneyde ,çapı 3,37 cm kalınlığı 3 cm olan silindirik alüminyum alaşımı üzerine ,elektrolitik Ag tozu ve metali koyulup ,vida tipi difüzyon kabına yerleştirilmiştir. Alüminyum alaşımı (% 8,85 Fe ,% 0,29 Cu ,% 3,15 Mg ,% 2,85 Mo ,% 0,96 Zn) içinde gümüşün yayılımı ,350 °C sıcaklıkta 152 saat süren ısıtıl işleminden

sonra ,kesit alma yöntemi kullanılarak incelenmiştir. Deneyde kullanılan birinci gümüş örneği (örnek 6) atomik emisyon spektrometresi ile ikinci gümüş örneği (örnek 7) nötron aktivasyon tekniği kullanılarak incelenmiş ,aşağıda belirtilen sonuçlar elde edilmiştir.

Örnek : 6 Ag-Al Alüminyum Alaşımı

Bu örnekten ısıtılı işlemden sonra alınan 10 kesitin atomik emisyon spektrometresi ile analizinden tablo (6.15) ve (6.16) da belirtilen değerler elde edilmiştir.

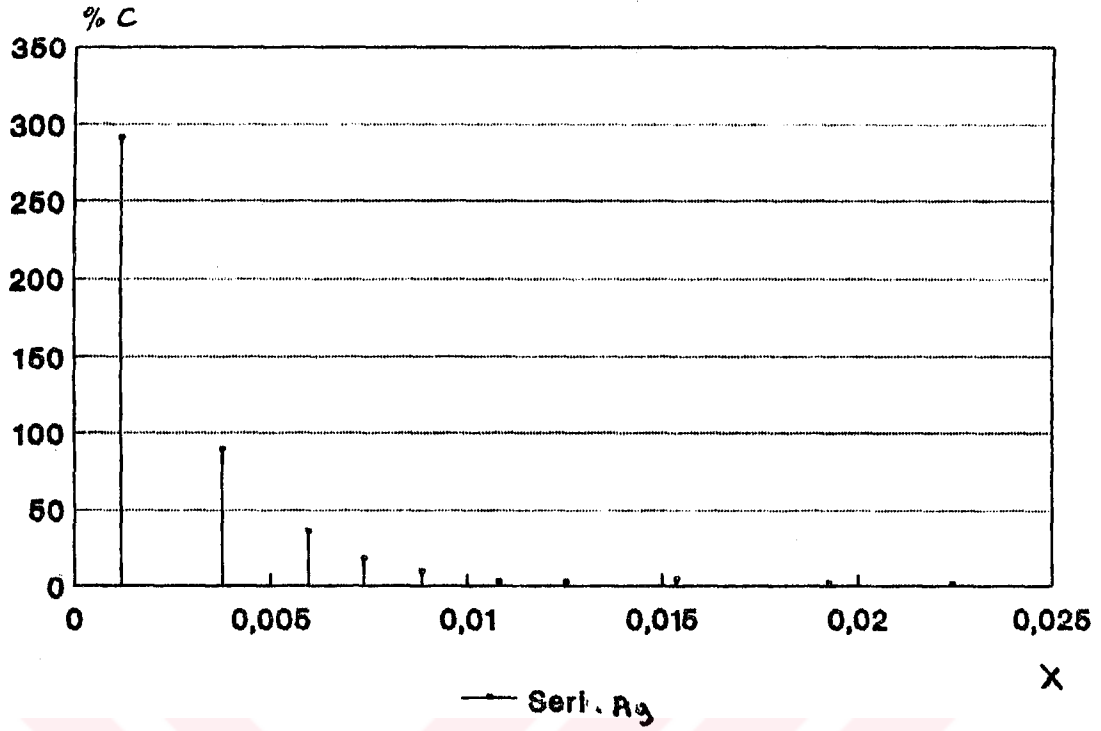
Tablo : 6.15 Gümüş Difüzyonu (Örnek 6) Kesit Analizi

Kesit No	m g	Δx 10^{-3} cm	x 10^{-3} cm	Ag % C
1	0,057	2,368	1,13	291,47
2	0,067	2,783	3,75	89,49
3	0,039	1,620	5,96	35,77
4	0,029	1,204	7,37	18,08
5	0,042	1,744	8,84	9,23
6	0,052	2,160	10,79	2,70
7	0,031	1,287	12,52	2,15
8	0,108	4,403	15,36	4,03
9	0,035	3,353	19,24	1,63
10	0,073	3,552	22,43	1,03

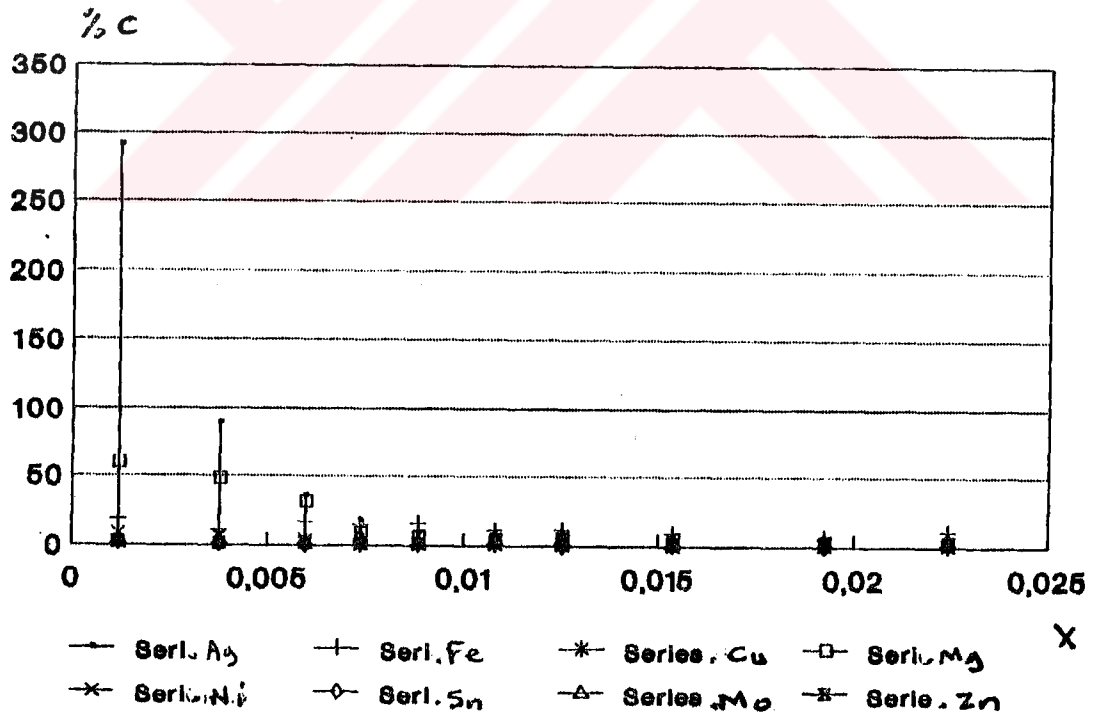
Tablo : 6.16 Ag-Al Alaşımı (Örnek 6) Difüzyon Çiftinde Elementlerin Konsantrasyonu

Kesit No	Al ppm	Ag ppm	%	Fe ppm	%	Cu ppm	%	Mg ppm	%	Mo ppm	%	Zn ppm	%
1	75,1	218,9	291,5	13,7	18,2	1,5	1,9	44,5	58,2	2,4	3,2	1,3	2,4
2	61,8	55,4	89,5	6,6	10,0	0,7	1,1	29,8	48,2	1,9	3,0	0,7	1,1
3	37,2	31,2	35,8	14,2	16,2	0,7	0,8	27,2	31,2	2,3	3,3	1,5	1,7
4	63,1	11,4	18,0	9,8	15,5	0,5	0,6	5,5	8,7	3,5	5,5	0,7	1,1
5	74,7	6,9	9,3	11,9	15,9	0,5	0,6	4,7	6,3	1,0	2,1	1,0	1,3
6	59,2	1,6	2,7	6,4	10,8	0,2	0,3	2,1	3,5	2,5	4,2	0,9	1,5
7	60,2	1,3	2,1	8,0	11,4	0,3	0,5	2,5	4,1	2,6	4,3	0,7	1,1
8	66,9	2,7	4,0	6,4	9,5	0,3	0,4	2,7	4,0	1,4	1,6	0,4	0,6
9	55,1	0,9	1,6	3,3	6,0	0,1	0,2	1,5	2,7	1,6	2,9	0,7	1,3
10	77,0	0,8	1,0	6,5	11,0	0,2	0,2	2,1	2,7	3,1	4,0	0,8	1,0

Tablo (6.15) ve (6.16) da belirtilen ölçümler kullanılarak şekil (6.22) ve (6.23) de görülen grafikler çizilmiş ,bu grafiklerden ,Ag atomlarının yüzeyden içeriye ,alaşım elemanı elementlerin yüzeye doğru yayındıkları ve yayılan elementlerin konsantrasyonunun difüzyon yol uzunluğuna bağlı olarak exponansiyel azaldığı anlaşılmıştır.

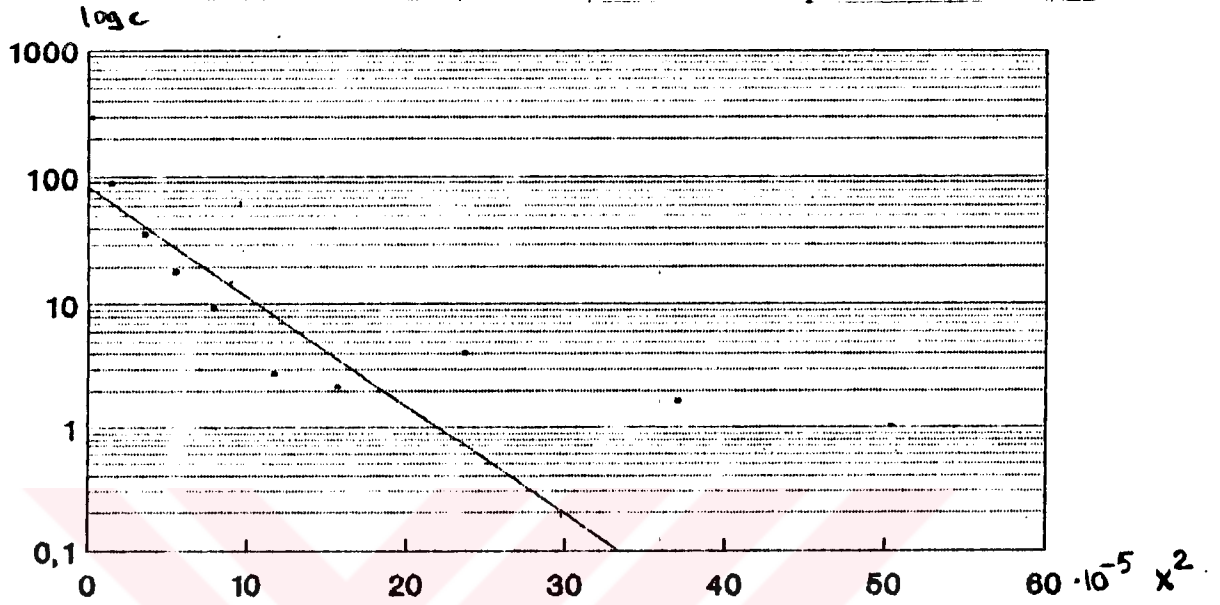


Şekil : 6.22 Gümüşün Al Alaşımı Yüzeyinden İçine Yayınlımı

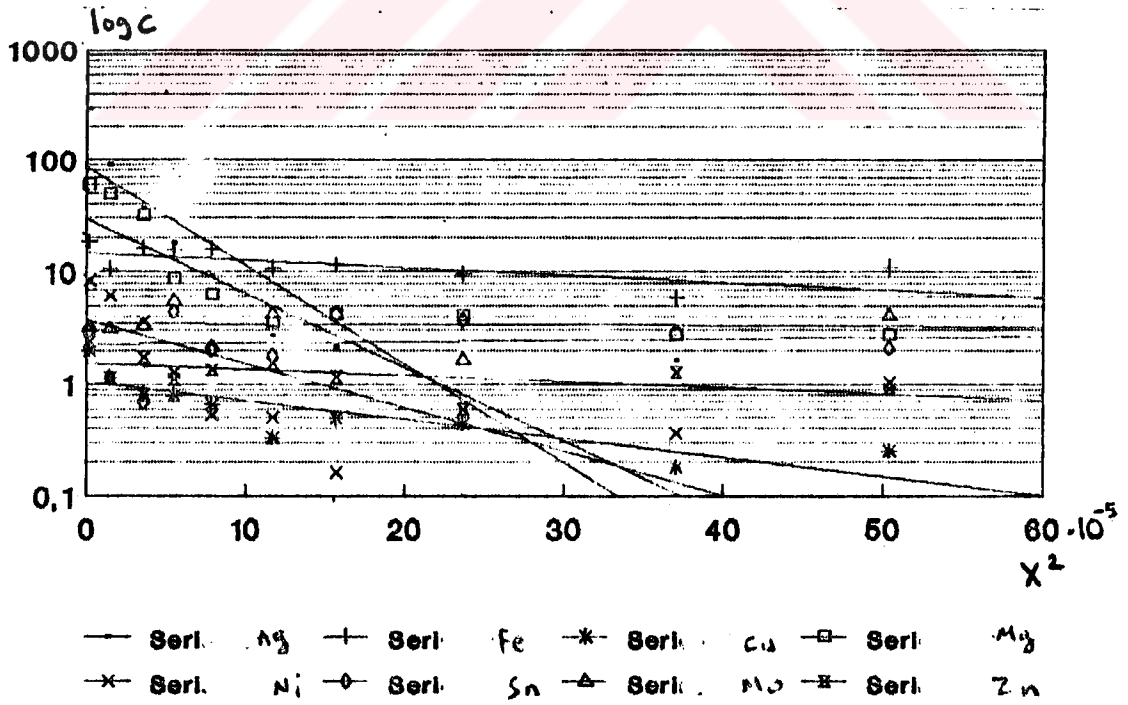


Şekil : 6.23 Ag-Al Alaşımı Difüzyon Çiftinde ,Alaşım Elemanlarının Yüzege Doğru Yayınlmaları

Şekil (6.22) ve (6.23) de ki grafiklerin $y=a.exp(-b.x)$ fonksiyonun grafiğine benzer çıkmaları nedeniyle ;(6.50) kararlı difüzyon formülünü gözönüne alarak $\log C=F(x^2)$ grafikleri (Şekil (6.24) ve (6.25)) çizilmiş ve en küçük kareler yöntemi ile Tablo (6.17) de görülen deneysel difüzyon denklemleri oluşturulup ,Tablo (6.18) de belirtilen Difüzyon katsayıları bulunmuştur.



Şekil : 6.24 Gümüş Difüzyonu $\log C=F(x^2)$ Grafiği



Şekil : 6.25 Örnek 6 Alayım Elementlerinin Difüzyonu , $\log C=F(x^2)$ Grafiği

Tablo : 6.17 Örnek 6 için En Küçük Kareler Yöntemi ile Oluşturulan DeneySEL Denklemler

Yayılan Element	DeneySEL Denklemler	Korelasyon Katsayısı
Ag	$C = 38,86 \exp(-3978,93 x^2)$	- 0,47
Fe	$C = 14,70 \exp(-1305,49 x^2)$	- 0,65
Cu	$C = 0,989 \exp(-3640,67 x^2)$	- 0,68
Mg	$C = 10,98 \exp(-5402,99 x^2)$	- 0,61
Mo	$C = 3,31 \exp(-115,20 x^2)$	- 0,05
Zn	$C = 1,45 \exp(-993,67 x^2)$	- 0,47
Ni	$C = 2,01 \exp(-3862,72 x^2)$	- 0,53
Sn	$C = 1,84 \exp(704,69 x^2)$	- 0,09

Tablo : 6.18 Alüminyum Alaşımında Ag ve Alaşım Elementlerinin DİFÜZYON Hızları

Yayılan Element	$D \text{ cm}^2 \text{ sn}^{-1}$ (Grafikten)	$D \text{ cm}^2 \text{ sn}^{-1}$ (EKKY ile)
Ag	$3,39.10^{-11}$	$3,08.10^{-11}$
Fe	$3,50.10^{-11}$	$3,49.10^{-10}$
Cu	$2,94.10^{-11}$	$1,25.10^{-10}$
Mg	$3,05.10^{-11}$	$8,45.10^{-11}$
Mo	$3,60.10^{-10}$	$3,96.10^{-9}$
Zn	$6,50.10^{-10}$	$4,59.10^{-10}$

Örneğin ,saat alüminyum içindeki difüzyon hızı $1,44.10^{-11} \text{ cm}^2 \text{ sn}^{-1}$ iken metal yapıya katılan gümüş miktarına göre büyümektedir. [15] Alaşım yapısına katılan diğer elementler de gümüş difüzyonunu hızlandırmaktadır. Bu çalışmada da alüminyum alaşımındaki elementlerin ;gümüş yayılımını hızlandırdığı belirlenmiş ve 350 °C de difüzyon katsayısı $5,08.10^{-11} \text{ cm}^2 \text{ sn}^{-1}$ olarak bulunmuştur. Al alaşımında ki elementlerin yüzeye doğru yayılmalarının incelenmesinden Kirkendall kuralına ve genel difüzyon kurallarına uygun sonuçları içeren tablo (6.18) deki değerler elde edilmiştir.

Örnek 7 Ag-Al Alaşım

Aktivasyon analizi tekniğinin tablo (5.1) de belirtilen tekniklere göre daha duyarlı olması gözönüne alınarak ,örnek 6 da ilk 10 kesitin atomik emisyon spektrometresi ile incelenmiş ,sonra difüzyon yüzeyinde kalan ,alüminyuma oranı % 1,03 olan gümüş

atomlarının yayılımını incelemek üzere 10 kesit daha alınıp , termal nötron akısı $10^4 - 10^7 \text{ n cm}^{-2} \text{ sn}^{-1}$ olan izotopik nötron kaynağında 180 gün ışınlanmıştır. Işınlama neticesinde $\text{Ag}(\text{Cn}, \gamma) \text{Ag}$ reaksiyonu sonucu oluşan radyoaktif Ag ,çok kanallı gama spektrometre ile analiz edilerek tablo (6.19) daki değerler elde edilmiştir.

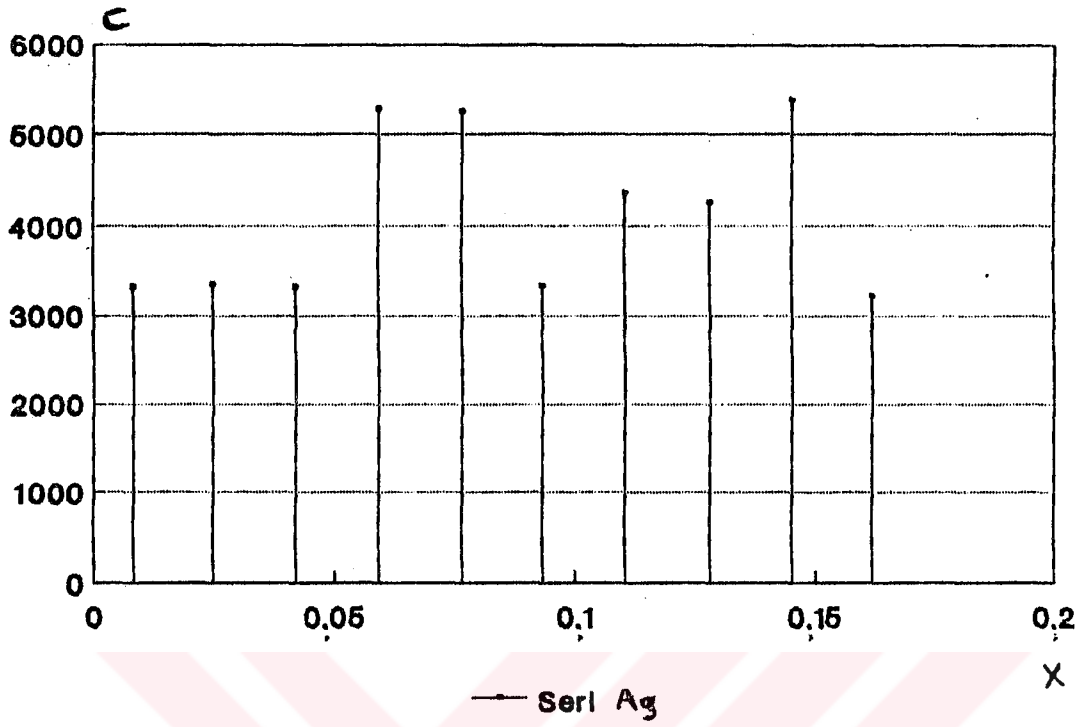
Tablo : 6.19 Gümüş Difüzyonun Aktivasyon Analizi ile İncelenmiştir

Örnek No	m 10^{-3} g	Δx 10^{-3} cm	x 10^{-3} cm	Deney C_d sayım/saat	Teorik C_t sayım/saat
1	390	16,20	8,1	6626	10126
2	407	16,90	24,6	6698	9115
3	426	17,69	41,9	6636	8102
4	409	16,99	59,2	10128	7039
5	417	17,32	76,4	10106	6070
6	394	16,36	93,2	6648	5064
7	432	17,04	110,4	8716	4051
8	417	17,32	128,0	6504	3038
9	413	17,15	145,2	0109	2025
10	352	16,28	162,0	6654	1012

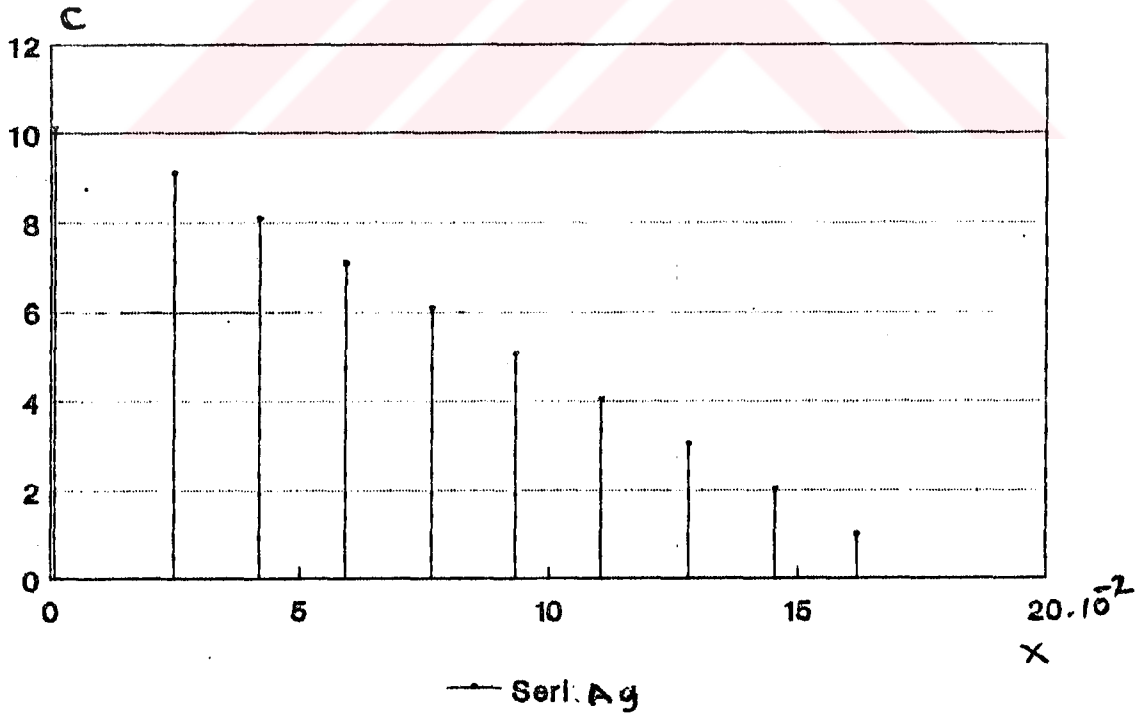
Nötron aktivasyon analizinde kullanılan çinko difüzyon düzeneğine benzer olan Ag difüzyon düzeneğinde de homojen olmayan ışınlamadan dolayı difüzyon yol uzunluğuna bağlı olarak radyoaktivite şiddetinin değişimi şekil (6.26) da görüldüğü gibi tesbit edilmiştir. Ancak teorik ve deneysel değerlendirme sonucunda tablo (6.19) da belirtilen x ve C_t kullanarak ,en küçük kareler yöntemi ile

$$C = 9941,22 \exp(-81,103 x^2) \quad (6.20)$$

eşitliği elde edilmiştir. Buradan $D_{\text{Ag}} = 5,63 \cdot 10^{-9} \text{ cm}^2 \text{ sn}^{-1}$ olarak bulunmuştur. Kabul edilen bu deneysel-teorik yaklaşıma göre tablo (6.19) da belirtilen x ve C_t değerlerine göre aktivitenin , dolayısıyla gümüş kütles konsantrasyonunun yol uzunluğuna göre değişimi şekil (6.27) de görüldüğü gibi olmaktadır.



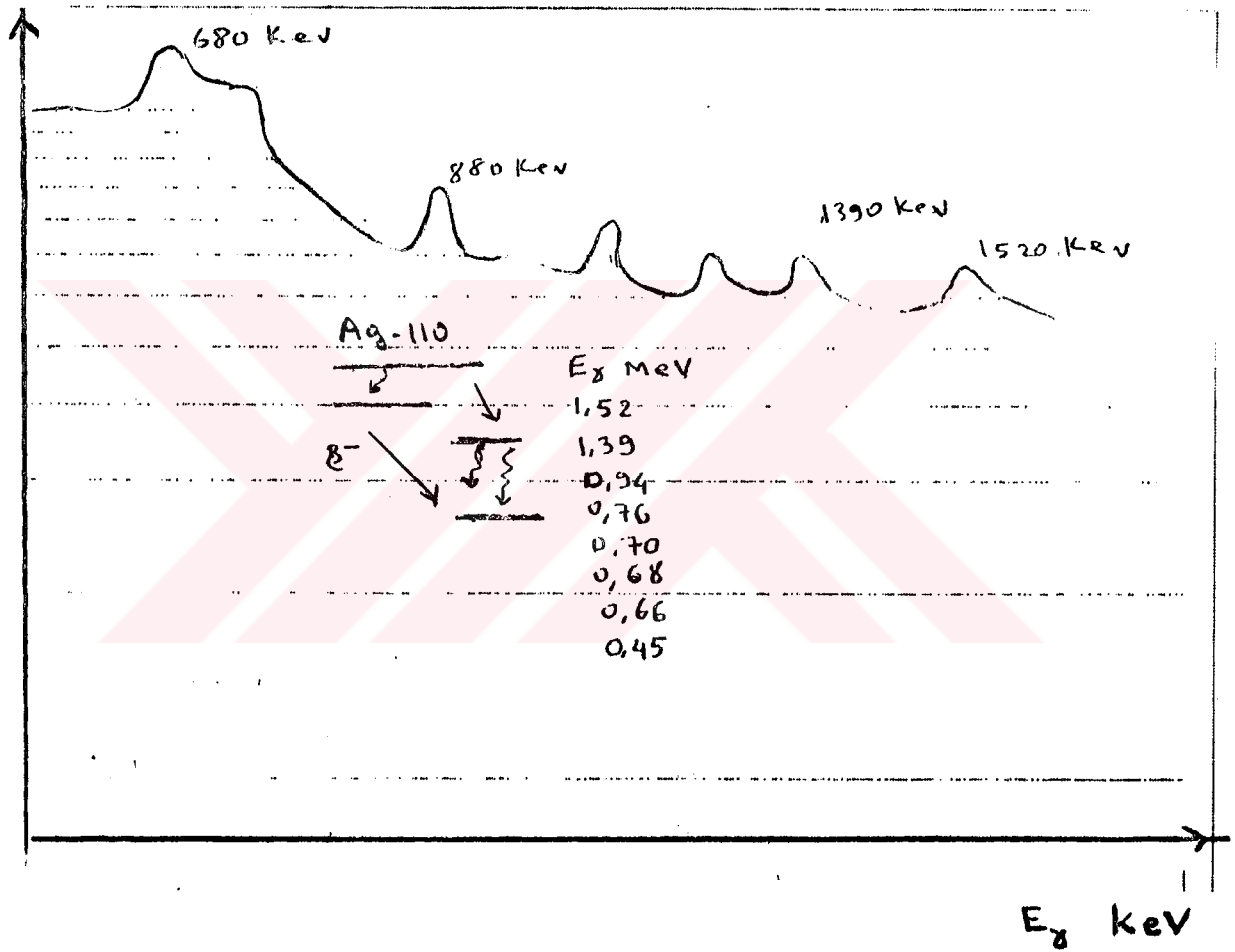
Şekil : b.26 Örnek 7 $c = F(x)$ Grafiği



Şekil : b.27 Örnek 7 $c = F(x)$ Grafiği (teorik)

Örnek 7 Ag-Al alaşım çiftinde kirkendall olayı nedeniyle alüminyum alaşımında 10. keitte meydana gelen değişim ve oksidasyon etkisiyle difüzyon hızının yavaş olduğu üst yüzey kesitler örnek 6'da analiz edilmek üzere ayrıldığından $D = 5,03 \cdot 10^{-9} \text{ cm}^2 \text{ sn}^{-1}$ olmuştur. Örnek 7 nin çok kanallı gamma spektrometresi ile yapılan analizinden ,Ag gamma enerjisi peak değerlerinin şekil 6.28'de belirtildiği gibi karmaşık bir durumda olduğu görülmüştür.

C sayım/saat



Şekil : 6.28 Ag-110 Gamma Spektrumu

Örnek 7'de saptanan difüzyon hızı ,saf alüminyumda $10^{-10} \text{ cm}^2 \text{ sn}^{-1}$ mertebesinde olan difüzyon hızından [32] büyük olarak saptanmış olması katkı maddelerinin etkisiyle olmuştur. Diğer taraftan

oksidasyon etkisinin hemen hemen tamamen ortadan kaldırılmış olması ve idealize edilmiş teorik-deneyisel değerlendirmeler neticesinde ideal bir sonuca ulaşılmıştır.

6.2.4 Magnezyum Difüzyonu

Magnezyumun ;% 6,1 Fe ,% 2,9 Cu ,% 1,6 Mg ,% 5,6 Mo ,% 3 Zn içeren alüminyum alaşımda yayınımlı kesit alma yöntemi ile incelenmiştir. Boru tipindeki difüzyon kabında ,aralarına Mg tozu konulan ,kesit yüzey alanı 1,516 cm² ,uzunluğu 3 cm olan alüminyum alaşımı ve Mg parçalar ,365 °C sıcaklıkta günde 8 saat süren toplam 32 saatlik ısıtılma işlemine tabi tutulmuştur. Isıtılma işleminden sonra alüminyum alaşımı parçanın yüzeyinden itibaren 10 kesit alınıp mikro terazide tartılıp , tablo (6.20) de belirtilen incelemeler yapılmıştır. Alınan kesitler atomik emisyon spektrometresinde analiz edilerek tablo (6.21) de belirtilen sonuçlar elde edilmiştir.

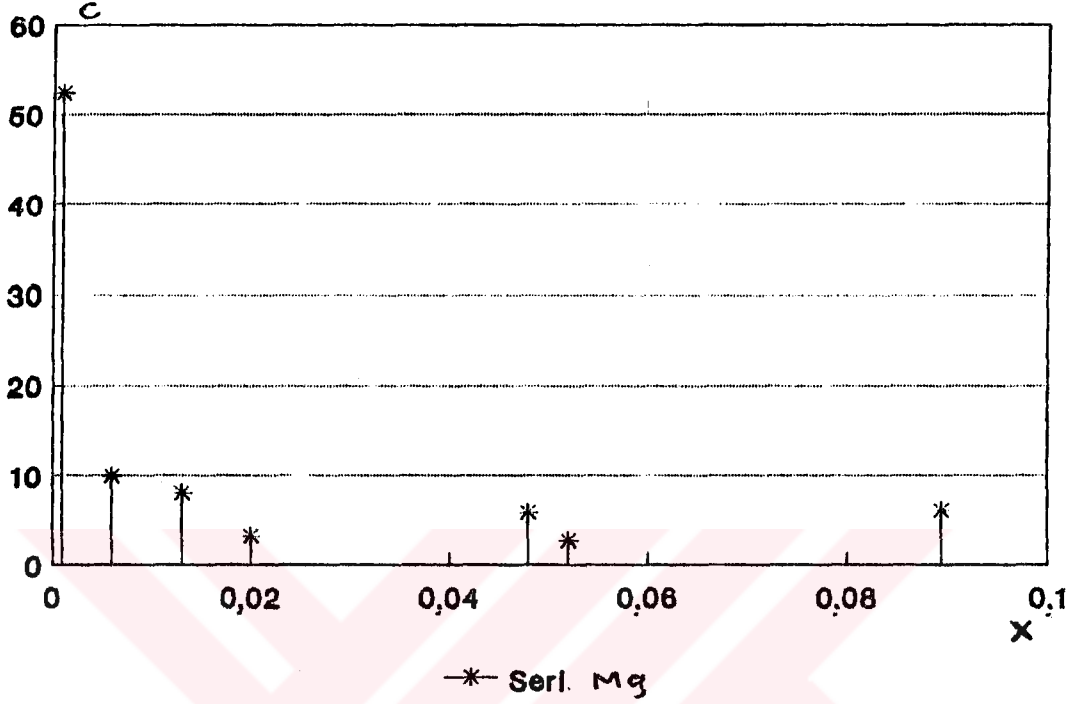
Tablo : 6.20 Mg Difüzyon Kesit Analizi

Kesit No	m 10 ⁻² g	x 10 ⁻³ cm	x 10 ⁻³ cm
1	1,0	2,44	1,22
2	3,0	7,33	6,10
3	2,9	7,08	13,31
4	2,6	6,35	20,03
5	3,3	8,06	27,23
6	3,0	7,32	38,47
7	2,8	7,08	52,03
8	5,2	12,70	70,60
9	10,0	24,43	89,41
10	5,4	13,20	48,00

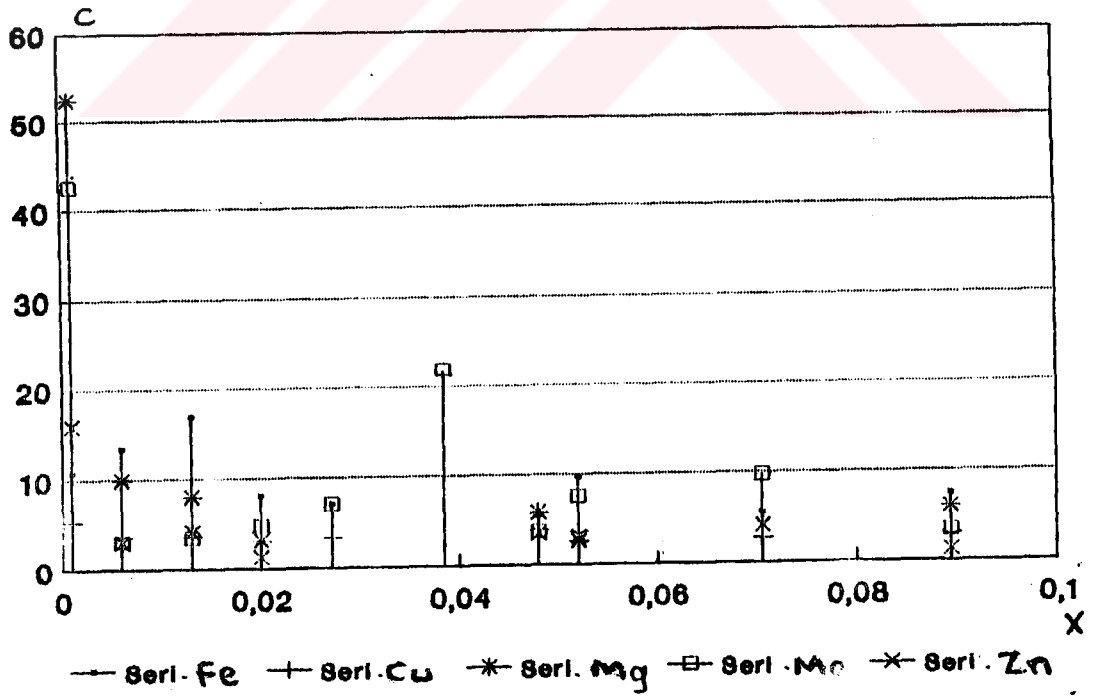
Tablo : 6.21 Mg-Al Alaşımı Difüzyon Çiftinde Yayınan Elementlerin Konsantrasyonu

Kesit No	Al ppm	Fe ppm %	Cu ppm %	Mg ppm %	Mo ppm %	Zn ppm %
1	42,7	4,6 10,7	2,3 5,4	22,4 4,2	1,6 4,2	6,8 15,9
2	35,2	4,7 13,3	1,3 3,7	3,5 3,1	1,1 3,1	1,1 3,1
3	45,9	7,7 16,7	1,7 3,7	3,7 3,4	1,6 3,5	1,9 4,1
4	31,1	2,5 8,0	1,3 4,2	1,0 4,8	1,5 4,8	0,4 1,3
5	8,5	0,6 7,0	0,3 3,5	0,2 7,0	0,6 7,0	0,1 1,9
6	5,5	0,5 8,0	0,2 3,6	0,1 21,8	1,2 21,8	0,1 2,5
7	18,6	1,9 9,6	0,7 3,7	0,5 7,5	1,4 7,5	0,6 3,2
8	7,2	0,4 5,5	0,2 2,7	0,2 9,7	0,7 9,7	0,3 4,1
9	68,7	5,1 7,4	2,8 3,1	4,2 3,5	2,4 3,5	0,9 1,3
10	93,5	5,1 5,4	3,7 3,9	5,5 3,7	3,5 3,7	1,1 3,0

Tablo (6.19) ve (6.20) de belirtilen değerler kullanılarak yaygın elementlerin C konsantrasyonunun, x difüzyon gel uzunluğuna bağlı olarak değişimi Şekil (6.29) ve (6.27) de görülen grafikler ile incelenmiştir. Bu grafiklerin, C ile x arasında $\propto$ potansiyel bir ilişkinin olmasını göstermesinden dolayı, en küçük kareler yöntemi ile $y = a \cdot \exp(-b \cdot x)$ tipi bir denklem olan $c = 10,23 \exp(-73,31 x)$ eşitliği oluşturularak buradan, $D = 2,95 \cdot 10^{-10} \text{ cm}^2 \text{ sn}^{-1}$ olarak hesaplanmıştır.

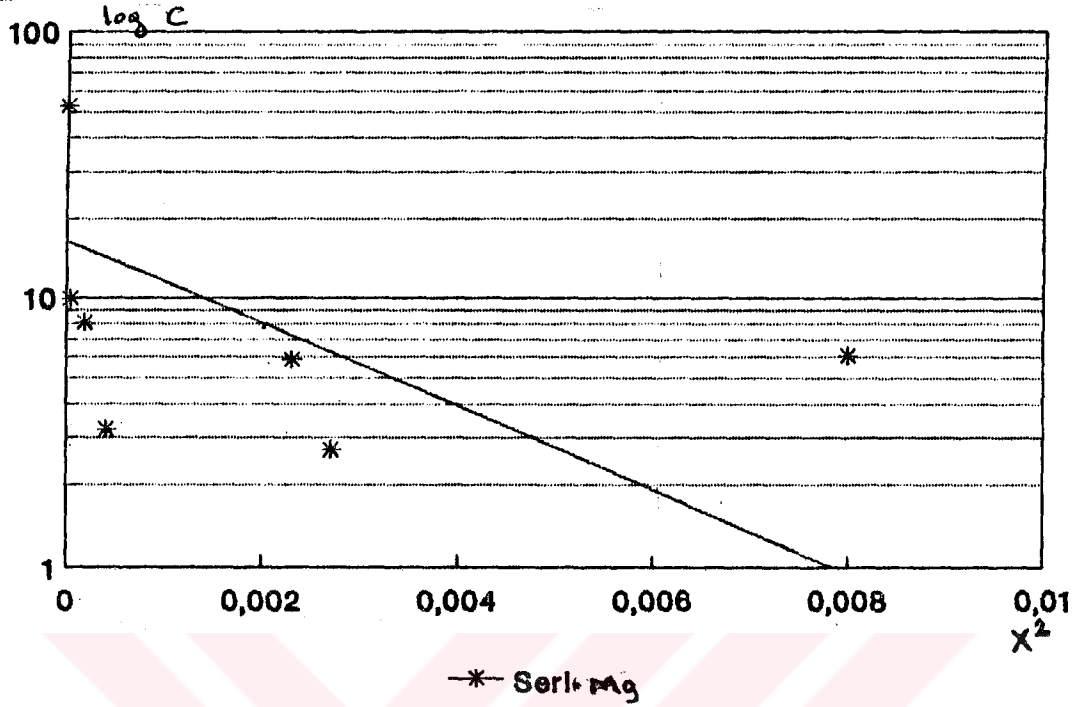


Şekil : 6.29 Mg Difüzyonu $c=F(x)$ Grafiği

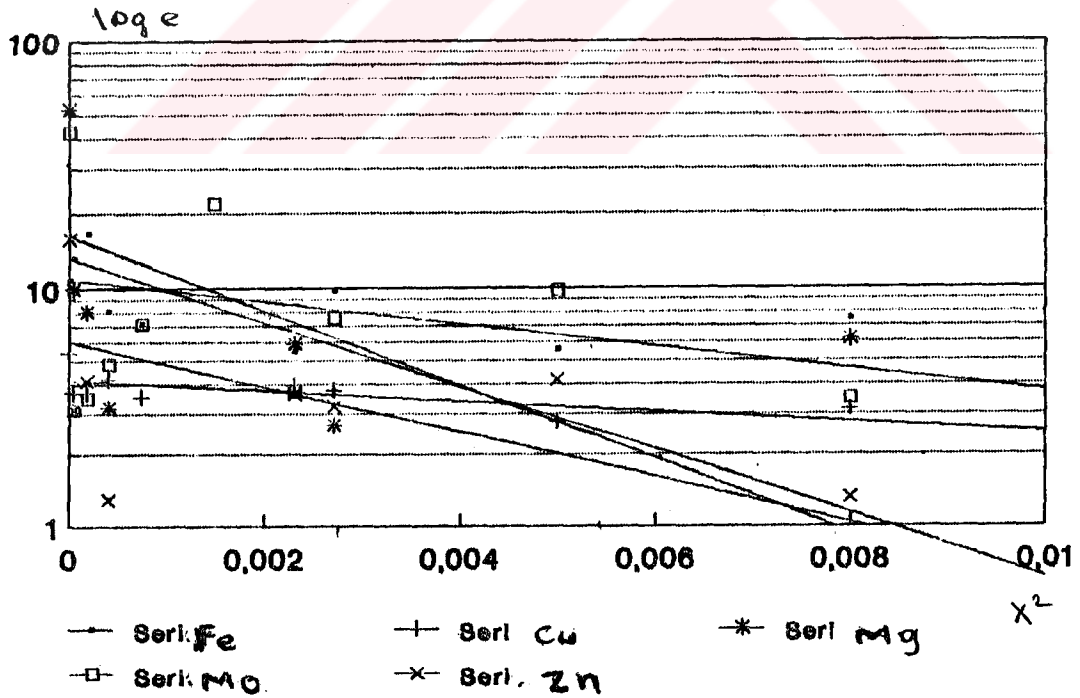


Şekil : 6.30 Örnek 8 Al Alaşımı Elementlerinin Difüzyonu

Magnezyum Konsantrasyonunun ,difüzyon yol uzunluğu ile eksponansiyel değişmesinden dolayı şekil (6.31) ve (6.32)'de görülen $\log c=F(x^2)$ grafikleri çizilerek ,alüminyum alaşımı ; yüzeyinden içeri yayılan magnezyumun ve içerisinden yüzeye yayılan alaşım elemanlarının difüzyon hızları grafik eğimi ile incelenmiştir.



Şekil : 6.31 Örnek 8 Mg Yayınımı $\log c=F(x^2)$ Grafiği



Şekil : 6.32 Örnek 8 Alaşım Elemanlarının Yayınımı $\log c=F(x^2)$

Mg ve alaşım elemanlarının yayılımının en küçük kareler yöntemi ile incelenmesi neticesinde tablo (6.21)'de görülen deneysel difüzyon denklemleri elde edilmiştir. Şekil (6.31) ve (6.32)deki grafiklerin eğimlerinden ve deneysel difüzyon denklemlerinden difüzyon katsayısı değerleri tablo (6.22)'de belirtildiği gibi bulunmuştur.

Tablo : 6.22 En Küçük Kareler Yöntemi (EKKY) ile Oluşturulan Deneysel Difüzyon Denklemleri

Yayılan Element	Deneysel Difüzyon Denklemleri	Korelasyon Katsayısı
Mg	$C = 7,56 \exp(-93,39 x^2)$	- 0,30
Fe	$C = 10,23 \exp(-73,31 x^2)$	- 0,51
Cu	$C = 4,10 \exp(-44,17 x^2)$	- 0,62
Mo	$C = 5,50 \exp(11,73 x^2)$	0,013
Zn	$C = 4,43 \exp(-117,23 x^2)$	- 0,37

Tablo : 6.23 Alüminyum Alaşımında Mg ve Alaşım Elemanlarının Difüzyon Hızları

Yayılan Element	D $\text{cm}^2 \text{sn}^{-1}$ (Grafikten)	D $\text{cm}^2 \text{sn}^{-1}$ (EKKY ile)
Mg	$1,93 \cdot 10^{-8}$	$2,32 \cdot 10^{-8}$
Fe	$0,25 \cdot 10^{-8}$	$2,95 \cdot 10^{-8}$
Cu	$2,37 \cdot 10^{-8}$	$4,91 \cdot 10^{-8}$
Mo	$5,00 \cdot 10^{-8}$	$1,34 \cdot 10^{-7}$
Zn	$0,82 \cdot 10^{-8}$	$1,35 \cdot 10^{-8}$

Saf alüminyumda magnezyum difüzyon hızı $10^{-10} \text{ cm}^2 \text{sn}^{-1}$ mertebesinde [33]. Alüminyum alaşımında ise katkı elementden arttıkça tablo (6.22)'de belirtildiği gibi difüzyon katsayısı büyümektedir. Ancak gözlemlerden magnezyumun kolayca parlayarak yanmasının şekil (4.5)'de belirtilen yüzey difüzyonu oluşumunda yayılma hızını azaltıcı oksidasyon etkisini arttıracakları anlaşılmıştır. Bu durum veya başka nedenlerden dolayı Mg yayılımı deneyinde korelasyon katsayısı küçük çıkmıştır.

6.2.5 Kobalt Difüzyonu

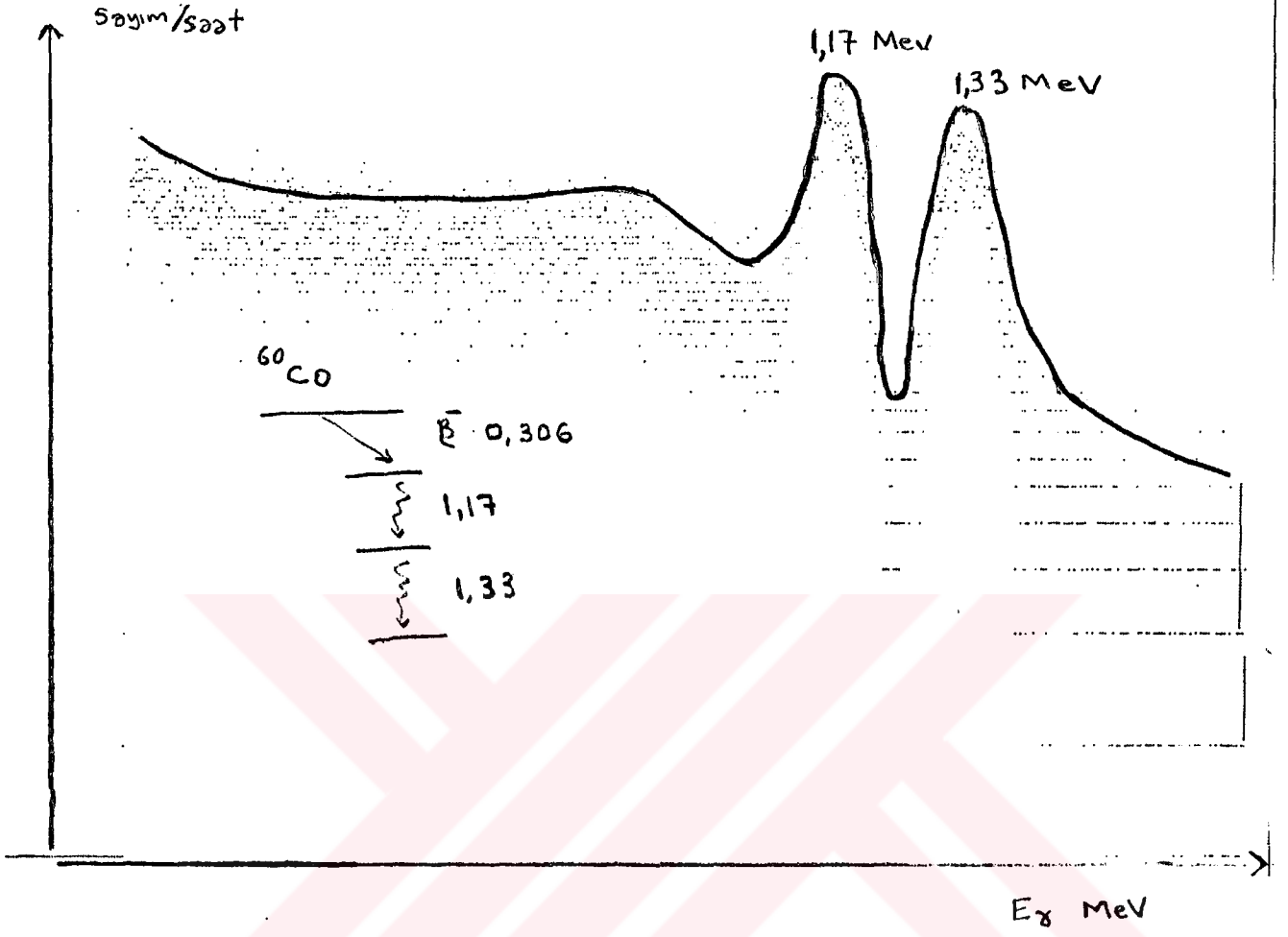
Metal atomlarının, bağlı bulundukları kendi kristal yapıları içinde yayılımı, bu atomların radyoizotoplarının yayılan madde

olarak kullanmak suretiyle incelenebilmektedir. Radyoaktif izotopların yayınladıkları α , β , γ ışınlarının izlenip ölçülmesi suretiyle saf veya alaşım durumundaki maddelerde de yayınımları incelenebilmektedir. Kobalt ,saf alüminyumda difüzyon hızı , 350-450 °C arasındaki sıcaklıklarda , $3,5 \cdot 10^{-11}$ - $1,4 \cdot 10^{-13}$ cm² sn⁻¹ aralığında değişmektedir [34] , [35].

Alüminyum alaşımlarında ise ,kobaltın yayınımlı ,bölüm 3'de belirtilen ,atomik büyüklük ,valans ,kristal yapı gibi faktörlere bağlı olarak alaşım elemanları ile etkileşmesine göre değişir. Genelde ,katkı atomların kristal yapıda yeni bir kristallografik düzen oluşturarak yerini almasına rağmen ,kristal yapıda kısmen bozukluklar meydana getirmektedir. Bu durumda,atomların bölüm 4 de açıklanan difüzyon oluşum mekanizmalarına kolaylık sağlamaktadır. Teorik ve deneysel bilgilere göre belirlenen bu durum ,kobaltın alüminyum alaşımına difüzyonunda da ,difüzyon hızını arttırıcı yönde sonuçlar verdiği ,aşağıda açıklanan deneyde saptanan değerler de görülmektedir. Çalışmanın bu aşamasında ;alüminyum alaşımına Co-60 radyoizotopunun yayınımlı incelemek üzere ,şekil (6.8)'de belirtilen vida ile sıkıştırmalı tip difüzyon düzeneği kullanılmıştır. Deneyde ,alaşım yapısı ,% 0,3 Fe ,% 2,9 Cu ,% 5,5 Mg ,% 1,6 Mo ,% 2 Zn oranında olan ,uzunluğu 3,5 cm ,çapı 1,98 cm boyutlarında ki silindirik parça hazırlanıp ,diğer örnekler de olduğu gibi mekanik ve kimyasal işlemlerle difüzyon yüzeyi parlatılmıştır. Deneyde ,yayınan madde olarak ,radyoaktivitesi 1 μ C olan Co-60 izotopu kullanılmıştır. Difüzyon düzeneği olarak hazırlanan , 3,4 cm derinliğinde , 1,2 cm çapında deliği olan alüminyum alaşımı metal oyuğuna ,konulan FeCl ile doyurulmuş HCL'de çözeltiilmiş Co-60 ,kobaltın kararlı izotopu Co-59'u yapısında bulunduran kobalt klorid (CoCl 6H O) ile karıştırılıp katılaştırılmıştır. Triklor etilenle son temizliği yapılan alüminyum alaşım parçası difüzyon yuzu ,kobalt karışımlı madde üzerine gelecek şekilde yerleştirilip ,mekanik sistemlerle vida sıkıştırılmıştır. Örnek 9 olarak adlandırılan bu difüzyon sistemi ,günde 8 saat süren 9 günlük bir ısıtma işlemi tabi tutulmuştur.

Isıl işlemden sonra difüzyon kabı kesilerek vida yuvasından çıkarılan örnekten ,difüzyon yüzeyinden itibaren 10 kesit bölüm (6.22)'de açıklanan tekniklerle alınıp ,mikro terazide tartılıp , (6.16) bağıntısı kullanılarak her bir kesitin kalınlığı hesaplanıp tablo (6.24)'de görülen değerler elde edilmiştir.

Plastik tüpler içinde ayrı ayrı biriktirilmiş olan her bir kesit örneği ,çok kanallı gamma spektrometresinde analiz edilmiş , analiz neticesinde şekil (3.3)'de görülen enerji peak değerleri gözlenerek ,difüzyon ortamında Co-60 atomlarının yayındığı tesbit edilmiştir.



Şekil : 6.33 Örnek 9 Co-60 Gamma Spektrumu

Tablo : 6.24 Örnek 9 Co-60 Difüzyonu Kesit Analizi

Kesit No	m g	Δx 10^{-3} cm	x 10^{-3} cm	C_s Sayım/Saat	C_b Sayım/g.sn
1	0,018	8,31	3,15	32848	507
2	0,024	2,41	10,51	30418	352
3	0,041	14,57	21,90	34994	237
4	0,043	15,08	38,63	31608	204
5	0,045	15,78	52,06	31982	86
6	0,076	26,05	73,32	29912	109
7	0,126	44,19	108,69	34518	76
8	0,122	42,78	152,18	32246	73
9	0,194	68,04	207,62	34126	49
10	0,272	95,39	289,33	28174	29

Tablo (6.24)'de belirtilen difüzyon yol uzunluğuna göre , radyasyon şiddetinin değişimi ,eşit kalınlıkta kesit alınamayışı nedeniyle her bir kesitteki radyoaktiviteyi bulmak için

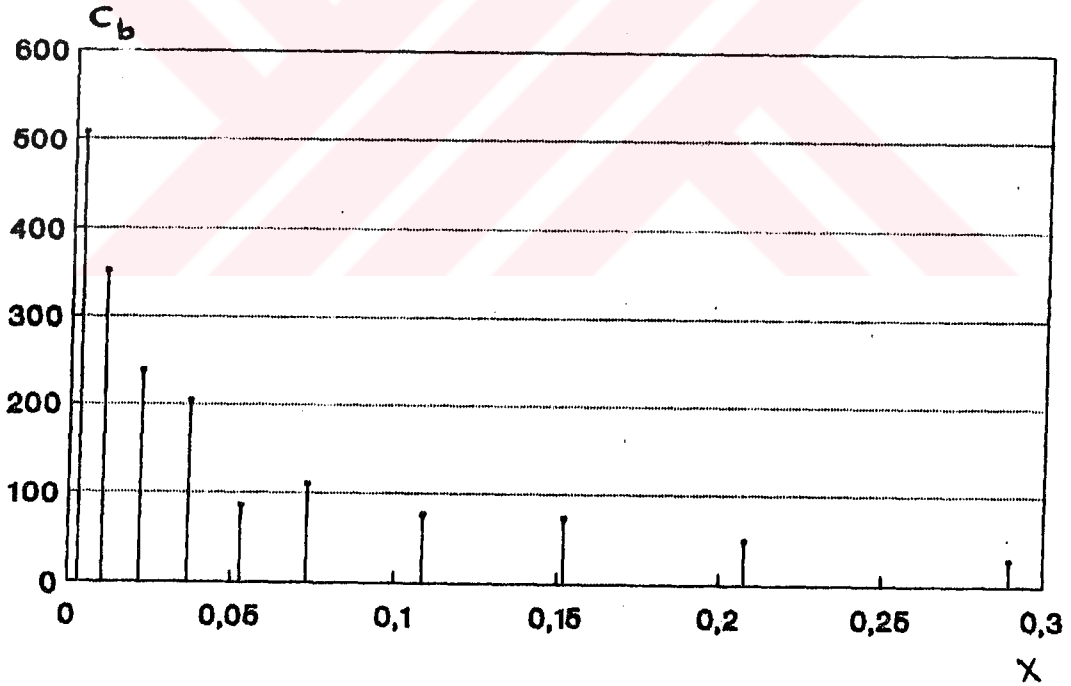
$$C_b = \frac{C_s}{m} \quad (6.30)$$

bağıntısı kullanılmıştır. Tablodanda görüleceği gibi C_s ,kesitin radyasyon şiddeti , C_b aynı kesitin bir gramının olabilecek radyasyon şiddetini ,m her bir kesitin kütlesini göstermektedir. Tablo (6.24)'de ki ölçüm değerleri kullanılarak deneysel denklem araştırılmıştır. Bunun için önceki örneklerde olduğu gibi ,C fonksiyonu ile x değişkeni arasında nasıl bir matematiksel ilişki olduğunu saptamak üzere şekil (6.34)'de ki $C=F(x)$ grafiği çizilmiştir. Bu grafiğin eksponansiyel bir matematik bağıntı vereceği gözönüne alınarak en küçük kareler yöntemi kullanılıp

$$C = 138,8 \exp(-26,33 x^2) \quad (6.31)$$

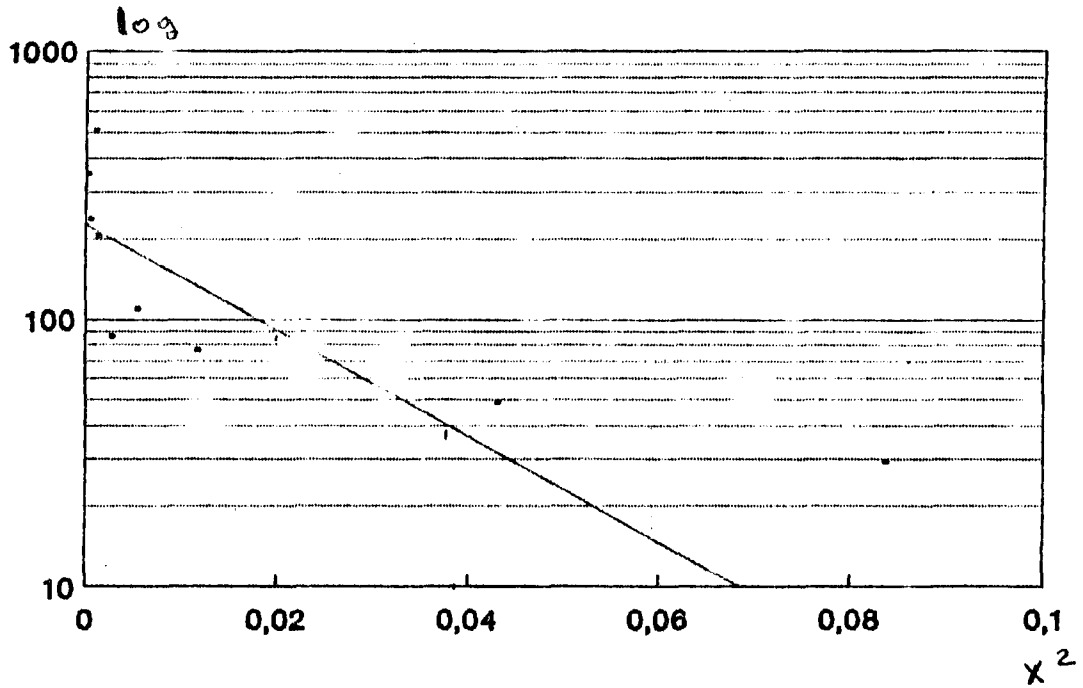
eşitliği elde edilmiştir.

Kararsız difüzyon durumunda Fick'in ikinci difüzyon denkleminin çözümü ve uygulaması olarak kullanılan (2.50) bağıntısı ile (6.31) bağıntısı arasında paralellik kurularak çizilen şekil (6.35)'de ki $\log C=F(x)$ grafiğinin eğimi hesaplanmıştır.



Co-2 a $C=F(x)$

Şekil : 6.34 Örnek 9 Co-60 Difüzyonu $C=F(x)$ Grafiği



Şekil : 6.35 Örnek 9 Co-60 Difüzyonu $\log C=F(x^2)$ Grafiği

Örnek 9'da ki alüminyum alaşımında kobalt difüzyon hızı :
 Deneysel difüzyon denklemi ve (6.20.b) formülünden yararlanılarak $D=3,66.10^{-8}$ cm sn değerinde bulunmuştur. Kobaltın difüzyon hızı ; grafik yöntem kullanılarak $\log C=F(x^2)$ grafiğinin eğimi (2.50) ve (6.20) bağıntıları birarada değerlendirilerek ,

$$D = 0,44.10^{-8} \text{ cm}^2 \text{ sn}^{-1}$$

olarak bulunmuştur. Deneyde ölçülen C ve x değerleri arasında ilişkinin doğruluğunu gösteren korelasyon katsayısı -0,582 olarak hesaplanmıştır. Korelasyon katsayısının değerinde görüleceği gibi ölçümlerde kısmen hata vardır. Bu nedenle grafik yöntemle belirlenen difüzyon katsayısı ,en küçük kareler yöntemi ile elde edilen değerden farklıdır. En küçük kareler yöntemi ,deneyde gözlenen değerler ile olması gereken en uygun değerler (teorik) arasındaki farkların karelerinin minimum yapılarak ,deneysel denklemi yazmamızı sağladığından ,diğer örneklerde olduğu gibi birarada en küçük kareler yöntemi ile saptanan difüzyon katsayısı netice olarak alınmıştır.

Bu çalışmada alüminyum alaşımlarında atomik difüzyonun teorik temelleri ve uygulaması üzerinde incelemeler yapılmış ,difüzyon ölçüm yöntemlerinden ,pratik ve kullanışlı olduğu saptanan kesit alma yöntemi kullanılarak ,Zn ,Cu ,Mg ,Ag ,Co atomlarının alüminyum alaşımlarında ki difüzyon hızları ölçülmüştür.

Metal atomlarının ,metale difüzyonunda difüzyon hızını azaltan en önemli faktör olan ,oksijen metal etkileşimi (oksidasyon) bu çalışmada da karşılaşılan bir güçlük olmuştur. Oksidasyon etkisini iyice azaltmak için ,difüzyon ortamından oksijenin uzaklaştırılması ,vakum sistemi veya basınçla difüzyon ortamının sıkıştırılması suretiyle sağlanır. Bu çalışmada ,vida veya basınçla sıkıştırmalı basit difüzyon düzenekleri yapılarak oksidasyon önleyici tedbirler alınmıştır. Alınan bu önlemlerde vakumla oksijeni ortamdaki uzaklaştırma yerine difüzyon ortamında oksijenin saklanabileceği ,girebileceği boşlukları doldurmak suretiyle oksidasyonu engellemek amaçlanmıştır.

Alüminyum alaşımına yayılımı incelemek için elementlerin erime sıcaklıklarına dikkat edilerek 350-450 °C aralığında ısıtılıp işlem yapılmıştır. Isıtılıp işlemde ,metal içindeki atomların yayımları zıt difüzyon olarak incelenmiş ,zıt difüzyonda da genel difüzyon kurallarının geçerli olduğu görülmüştür. Isıtılıp işlem sıcaklığının sabit tutulmasına rağmen günde 8 saat çalıştırılıp 16 saat süreyle kapalı tutulan ısı kaynağının ,soğuma ve tekrar ısınması difüzyonu kararsız duruma getirmekte olduğu en küçük kareler yöntemi ile çizilen grafiklerin analizinden anlaşılmıştır. Kararsız difüzyon için geçerli olan ikinci difüzyon denkleminin çözümünden elde edilen difüzyon bağıntılarının ,ölçüm sonuçlarını en küçük kareler yöntemi ile değerlendirerek oluşturulan deneysel difüzyon denklemleri ile eşdeğer olduğu saptanmıştır.

Deneysel ve teorik bağıntılar arasındaki uyum ölçüm tekniklerinde de saptanmıştır. Bu çalışmada kullanılan atomik emisyon spektrometresi ile çok kanallı gamma spektrometresi ölçümleri neticesinde ,nötron aktivasyon tekniğinin ,atomik emisyon spektrometresi tekniğine göre daha duyarlı olduğu tesbit edilmiştir.

Genelde ,yayınan element olarak kararlı izotop veya kararsız (radyoaktif) izotop kullanılmaktadır. Bu çalışmada farklı bir yaklaşımla ,kararlı izotopun yayındığı metal yüzeyinden alınan kesitin termal nötronlarla ışınlanması yapılarak ,difüzyon olayı incelenmiştir. Bu deneyde nötron aktivasyon tekniği ile belirlenen ölçümler ,nötron akısının homojen olarak difüzyon örnek maddesine duyurulmemesi ,akının düşük olması nedeniyle kesitler için hatalı bir aktivite sıralaması vermiştir. Bu durum deneysel değerlerle ,teorik varsayımların bir arada değerlendirilmesi suretiyle giderilmiş ,uygun sonuçlar elde edilmiştir.

Alüminyum alaşımında yayılan metal atomlarının difüzyon hızları 10^{-8} - 10^{-10} cm² sn⁻¹ mertebesinde bulunmuştur. Saf metalde yayılma durumunda bu değer 10^{-11} mertebesine kadar inmektedir.

Bu çalışmada ,alüminyum alaşımına ,metal atomlarının difüzyonu ölçüm yöntemleri detaylı olarak incelenmiş ,tesbit edilen değerlerin deneysel ve teorik yönlerden uyumlu olduğu saptanmıştır.

En Küçük Kareler Yöntemi ve Korelasyon Katsayısı Hesabı
Bilgisayar Yazılımı

```

10 REM
20 DIM X(100), Y(100), A(100), B(100)
30 CLS:COLOR 0,7:LOCATE 4,30:PRINT " A N A   M E N U ":COLOR 7,0
40 COLOR 10,0:LOCATE 7,25:PRINT "D":LOCATE 9,25:PRINT "U":LOCATE 11,25:PRINT "P":LOCATE 13,25:PRINT "F":LOCATE 15,25:PRINT "B":LOCATE 17,25:PRINT "T":COLOR 7,0
50 LOCATE 7,26:PRINT ".D o g r u s a l"
60 LOCATE 9,26:PRINT ".U s l e l"
70 LOCATE 11,26:PRINT ".Kesirlik"
80 LOCATE 13,26:PRINT ".P a r a b o l i k"
90 LOCATE 15,26:PRINT ".F o u r i e r   S e r i s i"
100 LOCATE 17,26:PRINT ". Trigonometrik (VERILER DERECE CINSINDEN)"
110 LOCATE 19,26:PRINT ". B i t i s i"
120 COLOR 15,0:A$=INKEY$: IF A$="" THEN 120
130 IF A$="D" OR A$="d" THEN 210
140 IF A$="U" OR A$="u" THEN 590
150 IF A$="P" OR A$="p" THEN 270
160 IF A$="F" OR A$="f" THEN 920
170 IF A$="B" OR A$="b" THEN 890
180 IF A$="K" OR A$="k" THEN 740
190 IF A$="T" OR A$="t" THEN 1480
200 PRINT CHR$(7):GOTO 120
210 GOSUB 1630:A=(T1*T2-N*T3)/(T1^2-N*T4)
220 B=T2/N-A*T1/N
230 PRINT TAB(5) "DOGRU DENKLEMI.....Y=";A;"* X + (";B;")"
240 PRINT:PRINT:PRINT:PRINT
250 PRINT TAB(10)"Ana Menu Icin Herhangi Bir Tusa Basiniz."
260 IF INKEY$="" THEN 260 ELSE 30
270 GOSUB 1630:U(1,1)=T4:U(1,2)=T1:U(1,3)=N:U(2,1)=T6:U(2,2)=T4:U(2,3)=T1
280 U(3,1)=T7:U(3,2)=T6:U(3,3)=T4
290 E(1)=T2:E(2)=T3:E(3)=T8
300 FOR K=1 TO 3
310 FOR I=1 TO 3
320 FOR J=1 TO 3
330 IF I=K OR J=K THEN 350
340 U(I,J)=U(I,J)-U(I,K)*U(K,J)/U(K,K)
350 NEXT J,I
360 U(K,K)=-1/U(K,K)
370 FOR I=1 TO 3
380 IF J=K THEN 440
390 U(I,K)=U(I,K)*U(K,K)
400 NEXT I
410 FOR J=1 TO 3
420 IF J=K THEN 440
430 U(K,J)=U(K,J)*U(K,K)
440 NEXT J
450 NEXT K
460 FOR I=1 TO 3
470 FOR J=1 TO 3
480 U(I,J)=-U(I,J)
490 NEXT J:NEXT I

```

```

0 FOR I=1 TO 3
0 V(I)=0
0 FOR J=1 TO 3
0 V(I)=V(I)+U(I,J)*E(J)
0 NEXT J:NEXT I
0 PRINT TAB(5)"PARABOL DENKLEMI...Y=";V(1);"* X +(";V(3);")"
0 PRINT:PRINT:PRINT
0 PRINT TAB(15)"Ana Menu Icin Herhengi Bir Tusa Basiniz."
0 IF INKEY$="" THEN 500 ELSE 30
0 GOSUB 1630:FOR I=1 TO N
0 Y(I)=LOG(Y(I))
0 NEXT I
0 T1=0:T2=0:T3=0:T4=0
0 FOR I=1 TO N
0 T1=T1+X(I):T2=T2+Y(I):T3=T3+X(I)*Y(I):T4=T4+X(I)^2
0 NEXT I
0 B=(T1*T2-N*T3)/(T1^2-N*T4)
0 A=T2/N-B*T1/N
0 A=EXP(A)
0 PRINT TAB(5)"ARANAN USLU DENKLEM ASAGIDAKI GIBIDIR":PRINT :PRINT
0 PRINT TAB(5)"C=";A;"*EXP(";B;"*X)"
0 PRINT:PRINT:PRINT:PRINT
0 COLOR 0,7:PRINT TAB(10)"ANA MENU ICIN HERHANGI BIR TUS ":COLOR 7,0
0 IF INKEY$="" THEN 730 ELSE 30
0 GOSUB 1630:FOR I=1 TO N
0 Y(I)=LOG(Y(I)):X(I)=LOG(X(I))
0 NEXT I
0 T1=0:T2=0:T3=0:T4=0
0 FOR I=1 TO N
0 T1=T1+X(I):T2=T2+Y(I):T3=T3+X(I)*Y(I):T4=T4+X(I)^2
0 NEXT I
0 B=(T1*T2-N*T3)/(T1^2-N*T4)
0 A=T2/N-B*T1/N
0 A=EXP(A)
0 PRINT TAB(5)"ARANAN KESIRLI DENKLEM ASAGIDAKI GIBIDIR":PRINT:PRINT
0 PRINT TAB(5)"Y=";A;"1/X^2";B
0 PRINT:PRINT:PRINT:PRINT
0 COLOR 0,7:PRINT TAB(10)"ANA MENU ICIN HERHANGI BIR TUS ":COLOR 7,0
0 IF INKEY$="" THEN 880 ELSE 30
0 CLS
00 LOCATE 10,20:COLOR 18,0:PRINT"I Y I G U N L E R"
0 STOP
20 '....FOURIER TRIGONOMETRIK SERI YAKLASIMI.....
30 '....2*N ;AYRIK NOKTA SAYISI
40 '....2*M+1 ;SERI ICIN KULLANILACAK KATSAYI
50 PI=2*ATN(1):CLS:COLOR 15,0
60 LOCATE 10,10:INPUT"VERILERIN ALT SINIRI : ",AA
70 LOCATE 12,10:INPUT"VERILERIN UST SINIRI : ",BB
80 LOCATE 14,10:INPUT"TOPLAM VERI SAYISI (CIFT SAYI) : ",N2
90 LOCATE 16,10:INPUT"SERI ICIN KULLANILACAK M DEGERI(<=n2/2-1): ",M
000 N=N2/2
010 CLS
020 COLOR 31,0:LOCATE 8,5:PRINT"X";:COLOR 7,0:PRINT" DEGERLERI"
030 COLOR 31,0:LOCATE 8,30:PRINT"F(X)";:COLOR 7,0:PRINT" DEGERLERI"
040 FOR I=1 TO N2:COLOR 7,0

```

```

1050 LOCATE 9+I,2:PRINT I;"->";:COLOR 15,0:INPUT"      ",X(I)
1060 LOCATE 9+I,30:INPUT"      ",Y(I)
1070 NEXT I:COLOR 7,0
1080 A0=0
1090 FOR I=1 TO N2
1100 A0=A0+Y(I)
1110 NEXT I
1120 A0=A0/N
1130 FOR KK=1 TO M
1140 A(KK)=0
1150 B(KK)=0
1160 FOR I=1 TO N2
1170 TETA=2*(X(I)-A0)*PI/(B0-A0)
1180 COST=COS(KK*TETA)
1190 SINT=SIN(KK*TETA)
1200 A(KK)=A(KK)+Y(I)*COST
1210 B(KK)=B(KK)+Y(I)*SINT
1220 NEXT I
1230 A(KK)=A(KK)/N
1240 B(KK)=B(KK)/N
1250 NEXT KK
1260 CLS
1270 PRINT
1280 PRINT TAB(11)"FOURIER YAKINLASIMI":PRINT
1290 PRINT:PRINT TAB(12)"N2=";N2;"      ";:M=";M:PRINT
1300 PRINT TAB(13)"X";TAB(25)"F(X)"
1310 PRINT TAB(10)"=====";TAB(23)"=====
1320 COLOR 15,0
1330 FOR I=1 TO N2
1340 PRINT TAB(11)X(I);TAB(25)Y(I)
1350 NEXT I
1360 PRINT
1370 PRINT TAB(11)"FOURIER KATSAYILARI":PRINT
1380 PRINT TAB(10)"A0=";A0
1390 FOR I=1 TO M
1400 PRINT TAB(10)"A";I;"=";B(I)
1410 NEXT I
1420 FOR I=1 TO M
1430 PRINT TAB(10)"B";I;"=";B(I)
1440 NEXT I
1450 PRINT:PRINT:PRINT
1460 COLOR 18:PRINT TAB(10)"ANA MENU ICIN HERHANGI BIR TUS"
1470 IF INKEY#="" THEN 1470 ELSE 30
1480 GOSUB 1630:FOR I=1 TO N
1490 X(I)=COS(X(I)*3.1416/180)
1500 NEXT I
1510 T1=0:T2=0:T3=0:T4=0
1520 FOR I=1 TO N
1530 T1=T1+X(I):T2=T2+Y(I):T3=T3+X(I)*Y(I):T4=T4+X(I)^2
1540 NEXT I
1550 B=(T1*T2-N*T3)/(T1^2-N*T4)
1560 A=T2/N-B*T1/N
1570 REM*****
1580 PRINT TAB(5)"ARANAN TRIGONOMETRIK DENKLEM ASAGIDAKI GIBIDIR":PRINT:PRINT
1590 PRINT TAB(5)"Y=";A;"+";B;"*COS(X)"

```

```

500 PRINT:PRINT:PRINT:PRINT
510 COLOR 0,7:PRINT TAB(10)"ANA MENU ICIN HERHANGI BIR TUS  ":COLOR 7,0
520 IF INKEY$="" THEN 1620 ELSE 30
530 CLS:COLOR 15,0:LOCATE 3,15:INPUT"NOKTA SAYISI      ":N
540 COLOR 31,0:LOCATE 8,5:PRINT"X";:COLOR 7,0:PRINT"  DEGERLERI"
550 COLOR 31,0:LOCATE 8,30:PRINT"C";:COLOR 7,0:PRINT"  DEGERLERI"
560 FOR I=1 TO N:COLOR 7,0
570 LOCATE 9+I,2:PRINT I;"->";:COLOR 15,0:INPUT"    ",X(I)
580 LOCATE 9+I,30:INPUT"        ",Y(I)
590 NEXT I:COLOR 7,0
700 T1=0:T2=0:T3=0:T4=0:T5=0:T6=0:T7=0:T8=0
710 FOR I=1 TO N
720 T1=T1+X(I):T2=T2+Y(I):T3=T3+X(I)*Y(I):T4=T4+X(I)^2:T5=T5+Y(I)^2
730 T6=T6+X(I)^3:T7=T7+X(I)^4:T8=T8+X(I)^2*Y(I)
740 NEXT I
750 P1=T3-T1*T2/N
760 P2=T4-T1*T1/N
770 P3=T5-T2*T2/N
780 CD=P1/(SQR(P2)*SQR(P3))
790 CLS
800 LOCATE 2,15:PRINT"KORELASYON KATSAYISI=";CD
810 PRINT:PRINT:PRINT:PRINT
820 RETURN

```


1a	2a	3b	4b	5b	6b	7b	8
1 H +1 1.00797							
3 Li +1 6.939	4 Be +2 9.0122 2-2						
11 Na +1 22.98976	12 Mg +2 24.312 2-2						
19 K +1 39.102	20 Ca +2 40.08 -8-2	21 Sc +3 44.956 -8-2	22 Ti +4 47.88 -8-10-2	23 V +5 50.942 -8-10-2	24 Cr +6 51.996 -8-13-1	25 Mn +7 54.938 -8-13-2	26 Fe +3 55.847 -8-14-2
37 Rb +1 85.47	38 Sr +2 87.62 -18-2	39 Y +3 88.905 -18-9-2	40 Zr +4 91.22 -18-10-2	41 Nb +5 92.906 -18-12-1	42 Mo +6 95.94 -18-13-1	43 Tc +7 97.907 -18-13-2	44 Ru +8 101.07 -18-13-2
55 Cs +1 132.905	56 Ba +2 137.34 -18-2	57 La +3 138.91 -18-9-2	58 Ce +3 140.12 -18-8-2	59 Pr +3 140.907 -21-8-2	60 Nd +3 144.24 -22-8-2	61 Pm +3 144.91 -22-8-2	62 Sm +3 150.35 -24-8-2
87 Fr +1 223	88 Ra +2 226 -18-8-2	89 Ac +3 227 -18-9-2	90 Th +4 232 -18-10-2	91 Pa +5 231 -21-9-2	92 U +6 238 -22-9-2	93 Np +7 237 -22-9-2	94 Pu +8 244 -24-8-2
101 La	102 Ce	103 Pr	104 Nd	105 Pm	106 Sm	107 Eu	108 Gd
109 Tm	110 Yb	111 Lu	112 Hf	113 Ta	114 W	115 Re	116 Os
121 Ho	122 Er	123 Tm	124 Yb	125 Lu	126 Hf	127 Ta	128 W
137 Fr	138 Ra	139 Ac	140 Th	141 Pa	142 U	143 Np	144 Pu
153 Eu	154 Gd	155 Tb	156 Dy	157 Ho	158 Er	159 Tm	160 Yb
173 Lu	174 Hf	175 Ta	176 W	177 Re	178 Os	179 Ir	180 Pt
197 Au	198 Hg	199 Tl	200 Pb	201 Bi	202 Po	203 At	204 Rn
217 Ts	218 Og	219 Nh	220 Fl	221 Mc	222 Lv	223 Ts	224 Og

Valens
K
39.102
2-8-1

elektron düzeni
Transition Elements

Group 8

1b	2b	3a	4a	5a	6a	7a	0	Orbit
5 B +3 10.811 2-3	6 C +4 12.01115 2-4	7 N +5 14.0067 2-5	8 O +6 15.9994 2-6	9 F +7 18.9984 2-7	10 Ne 0 20.183 2-8			K
13 Al +3 26.9815 2-8-3	14 Si +4 28.086 2-8-4	15 P +5 30.9738 2-8-5	16 S +6 32.064 2-8-6	17 Cl +7 35.453 2-8-7	18 Ar 0 39.948 2-8-8			K-L
29 Cu +2 63.546 -8-18-1	30 Zn +2 65.37 -8-18-2	31 Ga +3 69.72 -8-18-3	32 Ge +4 72.59 -8-18-4	33 As +5 74.9216 -8-18-5	34 Se +6 78.96 -8-18-6	35 Br +7 79.904 -8-18-7	36 Kr 0 83.80 -8-18-8	K-L-M
47 Ag +1 107.868 -18-18-1	48 Cd +2 112.40 -18-18-2	49 In +3 114.82 -18-18-3	50 Sn +4 118.69 -18-18-4	51 Sb +5 121.75 -18-18-5	52 Te +6 127.60 -18-18-6	53 I +7 126.904 -18-18-7	54 Xe 0 131.30 -18-18-8	K-L-M-N
79 Au +1 196.967 -32-18-1	80 Hg +2 200.59 -32-18-2	81 Tl +3 204.37 -32-18-3	82 Pb +4 207.19 -32-18-4	83 Bi +5 208.980 -32-18-5	84 Po +6 209 -32-18-6	85 At +7 210 -32-18-7	86 Rn 0 222 -32-18-8	K-L-M-N-O-P
101 La	102 Ce	103 Pr	104 Nd	105 Pm	106 Sm	107 Eu	108 Gd	
109 Tm	110 Yb	111 Lu	112 Hf	113 Ta	114 W	115 Re	116 Os	
121 Ho	122 Er	123 Tm	124 Yb	125 Lu	126 Hf	127 Ta	128 W	
137 Fr	138 Ra	139 Ac	140 Th	141 Pa	142 U	143 Np	144 Pu	
153 Eu	154 Gd	155 Tb	156 Dy	157 Ho	158 Er	159 Tm	160 Yb	
173 Lu	174 Hf	175 Ta	176 W	177 Re	178 Os	179 Ir	180 Pt	
197 Au	198 Hg	199 Tl	200 Pb	201 Bi	202 Po	203 At	204 Rn	
217 Ts	218 Og	219 Nh	220 Fl	221 Mc	222 Lv	223 Ts	224 Og	

*Lanthanides
**Actinides

Başlıca kararlı ve radyoaktif izotop

Atom
No

----- (Cbarnd)

(Cbarnd), E, Mev

1	H	^1H 99.985% $\sigma = 0.33$ ^2H 0.015% $\sigma =$ 0.00057 ^3H 12.26 y β^- 0.018
3	Li	^6Li 7.5% σ (n, α) = 950 $\sigma = \leq 0.1$ ^7Li 92.5% $\sigma = 0.033$ ^8Li 0.84 s β^- 13
4	Be	^7Be 53.4% γ ^9Be 100% $\sigma = 0.01$ ^{10}Be $2.7 \cdot 10^6$ y β^- 0.56 ^{11}Be 14 s
5	B	^{10}B 0.5 s β^+ 14 ^{11}B 81.2% $\sigma < 0.05$ σ (n, α) = 4020 ^{12}B $\sigma_1 = 755$ ^{13}B 81.2% $\sigma < 0.05$
6	C	^{12}C 19 s β^+ 1.9 γ ^{11}C 20.5 m β^+ 0.96 ^{13}C $\sigma_1 = 0.003$ ^{14}C 98.89% $\sigma = 0.0032$ ^{15}C 1.11% $\sigma = 0.0009$ β^- 5600 y β^- 0.158 $\sigma = < 10^{-6}$ ^{16}C 2.3 s
7	N	^{13}N 10 m β^+ 1.20 ^{14}N 99.63% σ (n,p) = 1.8 $\sigma = 0.1$ ^{15}N 0.37% $\sigma = 0.00002$ ^{16}N 7.4 s β^- 10.4 γ ^{17}N 4.14 s β^- 3.7
8	O	^{14}O 72 s β^+ 1.83 γ ^{15}O 2.1 m β^+ 1.7 ^{16}O $\sigma_1 = 0.0002$ ^{17}O 0.037% $\sigma = 0.0002$ ^{18}O 29 s β^- 4.4 γ ^{18}O 0.204% $\sigma = 0.0002$ ^{19}O 29 s β^- 4.4 γ
9	F	^{17}F 66 s β^+ 1.75 ^{18}F 1.87 h β^+ 0.65 ^{19}F $\sigma_1 = 0.009$ ^{20}F 100% $\sigma = 0.009$ ^{21}F 11 s β^- 5.42 γ ^{21}F 5 s β^-
11	Na	^{21}Na 23 s β^+ 2.50 ^{22}Na 2.6 y β^+ 0.54 ^{23}Na $\sigma_1 = 0.53$ ^{24}Na 100% $\sigma = 0.53$ ^{25}Na 15.0 h β^- 1.39 γ ^{25}Na 60 s β^- 4.0 γ

12	Mg	^{23}Mg 12 s β^+ 3.0 ^{24}Mg 78.3% $\sigma = 0.03$ ^{25}Mg 10.1% $\sigma = 0.27$ ^{26}Mg 11.1% $\sigma = 0.03$ ^{27}Mg $\sigma_1 = 0.063$ 9.5 m β^- 1.75 γ ^{28}Mg 21.3 h β^- 0.45 γ
13	Al	^{24}Al 2.1 s β^+ ≤ 8.5 γ ^{25}Al 7.3 s β^+ 3.24 ^{26}Al 6.5 s β^+ 3.21 ^{27}Al 100% $\sigma = 0.23$ ^{28}Al 2.30 m $\sigma_1 = 0.23$ 1.20 γ ^{29}Al 100% $\sigma = 0.23$ ^{30}Al 2.30 m β^- 2.87 γ ^{31}Al 6.6 m β^- 2.5 γ
14	Si	^{26}Si 1.7 s β^+ ^{27}Si 4.4 s β^+ 3.8 ^{28}Si 92.17% $\sigma = 0.1$ ^{29}Si 4.71% $\sigma = 0.3$ ^{30}Si 3.12% $\sigma =$ 0.11 ^{31}Si 2.62 h β^- 1.43 γ ^{32}Si ≈ 300 y β^- 0.1
15	P	^{29}P 4.5 s β^+ 3.94 γ ^{30}P 2.5 m β^+ 3.3 ^{31}P $\sigma_1 = 0.20$ 100% $\sigma = 0.20$ ^{32}P 14.5 d β^- 1.71 ^{33}P 25 d β^- 0.25 ^{34}P 12.4 s β^- 5.1 γ
16	S	^{31}S 2.6 s β^+ 4.4 ^{32}S 95.0% ^{33}S 0.75% σ (n,p) = 0.002 ^{34}S 4.2% $\sigma = 0.26$ ^{35}S 87 d β^- 0.167 ^{36}S 0.017 $\sigma = 0.14$ ^{37}S 5.0 m β^- 4.7 γ
17	Cl	^{33}Cl 2.8 s β^+ 4.2 γ ^{34m}Cl 32.4 m β^+ 2.5 ^{35}Cl 1 T ^{36}Cl 1.5 s β^+ 4.5 ^{37}Cl 75.5% $\sigma = 44$ σ (n,p) = 30 ^{38}Cl 3.1 $^{10^5}$ y β^- 0.71 ^{39}Cl 24.47% $\sigma =$ (0.005 + 0.56) ^{40}Cl 37.3 m β^- 4.8 γ ^{41}Cl 1 s ^{42}Cl 0.66 ^{43}Cl 55 m β^- 3.0 γ ^{44}Cl 1.4 m β^- 7 γ
19	K	^{38m}K 0.95 s β^+ 5.1 ^{39}K 7.7 m β^+ 2.7 γ ^{40}K 93.2% $\sigma = 1.9$ ^{41}K 6.8% $\sigma = 1.1$ ^{42}K 12.5 h β^- 3.5 γ ^{43}K 22 h β^- 1.84 γ ^{44}K 22 m β^- 4.9 γ ^{45}K 34 m β^-
20	Ca	^{39}Ca 1.0 s β^- 5.7 ^{40}Ca 96.9% $\sigma = 0.2$ ^{41}Ca 1.1 $^{10^5}$ y ^{42}Ca 0.64% $\sigma = 40$ ^{43}Ca 0.14% ^{44}Ca 2.1% $\sigma = 0.6$ ^{45}Ca 160 d β^- 0.25 ^{46}Ca 4.7 d β^- 2.0 γ ^{47}Ca 0.18% $\sigma = 1.1$ ^{48}Ca 8.7 m β^- 2.0 γ
21	Sc	^{41}Sc 0.87 s β^+ 5 ^{42}Sc 0.66 s β^+ ^{43}Sc 3.9 h β^- 1.19 γ ^{44}Sc 2.4 d ^{45}Sc 0.271 ^{46}Sc 4.0 h β^- 1.47 ^{47}Sc ^{48}Sc 100% $\sigma = (10+13)$ ^{49}Sc 20 s ^{50}Sc 17 d β^- 0.14 e- ^{51}Sc 85 d β^- 0.36 ^{52}Sc 3.4 d β^- 0.60 γ ^{53}Sc β^- 0.64 γ ^{54}Sc 57 m β^- 2.0 ^{55}Sc 1.7 m β^- 3.5 γ

22 Ti $\sigma_t = 6.0$
 ^{43}Ti 0.6 s $\beta^+ - ^{44}\text{Ti}$ > 20 y K $\gamma - ^{45}\text{Ti}$ 3.08 h β^+
 ^{46}Ti 1.02 K ^{48}Ti 8.0% $\sigma = 0.5 - ^{47}\text{Ti}$ 7.4% $\sigma = 1.6 - ^{48}\text{Ti}$
 ^{73}Ti 8% $\sigma = 7.8 - ^{49}\text{Ti}$ 5.5% $\sigma = 1.8 - ^{50}\text{Ti}$ 5.3% $\sigma =$
 $0.14 - ^{51}\text{Ti}$ 5.80 m $\beta - ^{51}\text{Ti}$ γ

23 V $\sigma_t = 4.9$
 ^{45}V 1 s $\beta^+ - ^{47}\text{V}$ 31 m $\beta^+ 1.89 - ^{49}\text{V}$
 ^{46}V 16.2 d $\beta^+ 0.69$ K $\gamma - ^{49}\text{V}$ ~ 1 y K ^{50}V 0.23%
 $\sigma = \sim 100 - ^{51}\text{V}$ 99.75% $\sigma = 4.5 - ^{52}\text{V}$ 3.77 m
 $\beta^+ 2.6$ $\gamma - ^{53}\text{V}$ 2.0 m $\beta^+ 2.50$ γ ^{54}V 55 s
 $\beta^+ 3.3$ γ

24 Cr $\sigma_t = 3.1$
 ^{46}Cr 1.1 s $\beta^+ - ^{48}\text{Cr}$ 23 h K $\gamma - ^{49}\text{Cr}$ 42 m
 $\beta^+ 1.54$ $\gamma - ^{50}\text{Cr}$ 4.4% $\sigma = 16 - ^{51}\text{Cr}$ 27 d K
 ^{52}Cr 83.7% $\sigma = 0.8 - ^{53}\text{Cr}$ 9.5% $\sigma = 13 -$
 ^{54}Cr 2.4% $\sigma = 0.37 - ^{55}\text{Cr}$ 3.6 m $\beta^+ 2.8$

25 Mn $\sigma_t = 13.3$
 ^{51}Mn 45 m $\beta^+ 2.2 - ^{52}\text{Mn}$ 21 m $\beta^+ 2.7$ $\gamma -$
 ^{52}Mn 5.7 d K $\beta^+ 0.6$ $\gamma - ^{53}\text{Mn}$ ~ 140 y K ^{54}Mn
 ^{54}Mn 2 m IT $\beta^+ 0.6 - ^{55}\text{Mn}$ 300 d K $\gamma -$
 ^{55}Mn 100% $\sigma = 13.3 - ^{56}\text{Mn}$ 2 h 58 $\beta^+ 2.8$ $\gamma -$
 ^{57}Mn 1.7 m $\beta^+ 2.6$ γ

26 Fe $\sigma_t = 2.5$
 ^{52}Fe 8 h $\beta^+ 0.80(2.7)$ K $\gamma - ^{53}\text{Fe}$ 9 m $\beta^+ 2.6$
 $\gamma - ^{54}\text{Fe}$ 5.9% $\sigma = 2.2 - ^{55}\text{Fe}$ 2.9 y K ^{56}Fe
 ^{56}Fe 91.6% $\sigma = 2.6 - ^{57}\text{Fe}$ 2.20% $\sigma = 2.4 -$
 ^{58}Fe 0.33% $\sigma = 0.9 - ^{59}\text{Fe}$ 45 d $\beta^+ 1.56$ $\gamma -$
 ^{60}Fe 3 $\cdot 10^5$ y $\beta^+ (\gamma 0.059) - ^{61}\text{Fe}$ 5.5 m $\beta^+ \gamma$

27 Co $\sigma_t = 37$
 ^{55}Co 18 h $\beta^+ 1.50$ K $\gamma - ^{56}\text{Co}$ 77 d K $\beta^+ 1.50$
 $\gamma - ^{57}\text{Co}$ 267 d $\gamma - ^{58}\text{Co}$ 9 h IT 0.025
 ^{59}Co 71 d K $\beta^+ 0.48$ $\gamma - ^{60}\text{Co}$ 100% $\sigma =$
 $(18 + 19) - ^{60}\text{Co}$ 10.5 m IT 0.059 $\beta^+ 1.5$ $\gamma \sigma =$
 $\sim 100 - ^{60}\text{Co}$ 5.2 y $\beta^+ 0.31$ $\gamma \sigma \sim ^{61}\text{Co}$ 1.65 h
 $\beta^+ 1.22$ $\gamma - ^{62}\text{Co}$ 1.6 m $\beta^+ \gamma - ^{63}\text{Co}$ 14 m $\beta^+ 2.8$ γ

28 Ni $\sigma_t = 4.6$
 ^{56}Ni 6.4 d K $\gamma - ^{57}\text{Ni}$ 36 h K $\beta^+ 0.84$
 $\gamma - ^{58}\text{Ni}$ 68.0% $\sigma = 4.3 - ^{59}\text{Ni}$ 8 $\cdot 10^4$ y K
 ^{60}Ni 26.2% $\sigma = 2.6 - ^{61}\text{Ni}$ 1.1% $\sigma = 2 -$
 ^{62}Ni 3.7% $\sigma = 15 - ^{63}\text{Ni}$ 80 y $\beta^+ 0.063 -$
 ^{64}Ni 1.0% $\sigma = 2 - ^{65}\text{Ni}$ 2.56 h $\beta^+ 2.10$ γ
 ^{66}Ni 56 h $\beta^+ 0.3$

29 Cu $\sigma_t = 3.7$
 ^{59}Cu 9.5 m $\beta^+ < 0.7 - ^{60}\text{Cu}$ 3 s $\beta^+ \sim 8 - ^{61}\text{Cu}$
 ^{61}Cu 3.7 $\gamma - ^{62}\text{Cu}$ 24 m $\beta^+ 3.9$ $\gamma - ^{63}\text{Cu}$
 ^{63}Cu 3.3 h $\beta^+ 1.22$ K $\gamma - ^{64}\text{Cu}$ 9.9 m $\beta^+ 2.9 - ^{65}\text{Cu}$
 ^{65}Cu 69.0% $\sigma = 4.4 - ^{66}\text{Cu}$ 12 $\cdot 8$ h K $\beta^+ 0.57$ $\beta^+ 0.66$

$\gamma - ^{65}\text{Cu}$ 31.0% $\sigma = 2.2 - ^{66}\text{Cu}$ 5.1 m $\beta^+ 2.63$ γ
 $\sigma = 14.0 - ^{67}\text{Cu}$ 61 h $\beta^+ 0.58$ $\gamma \text{ e}^- - ^{68}\text{Cu}$ 32 s
 $\beta^+ 3.0$ γ

30 Zn $\sigma_t = 1.10$
 ^{60}Zn 2.1 m ^{61}Zn 1.5 m $\beta^+ 5 - ^{62}\text{Zn}$ 9 h K
 $\beta^+ 0.66$ $\gamma \text{ e}^- - ^{63}\text{Zn}$ 38 m $\beta^+ 2.36$ K γ
 ^{64}Zn 48.0% $\sigma = 0.5 - ^{65}\text{Zn}$ 245 d K $\beta^+ 2.35$
 $\gamma - ^{66}\text{Zn}$ 27.8% ^{67}Zn 4.1% ^{68}Zn 18.5%
 $\sigma = (0.09 + 1.0) - ^{69}\text{Zn}$ 14 h IT ^{69}Zn 52 m
 $\sigma = 0.90 - ^{70}\text{Zn}$ 0.63% $\sigma = 0.09 - ^{71}\text{Zn}$ 3 h
 $\beta^+ 1.5$ $\gamma - ^{71}\text{Zn}$ 2.2 m $\beta^+ 2.4$ $\gamma - ^{72}\text{Zn}$ 49 h
 $\beta^+ 1.6$ γ

31 Ga $\sigma_t = 2.9$
 ^{64}Ga 2.5 m $\beta^+ \sim 5$ $\gamma - ^{65}\text{Ga}$ 15 m IT 0.052
 $\gamma \beta^+ 2.5 - ^{65}\text{Ga}$ 8 m $\beta^+ 2.2 - ^{66}\text{Ga}$ 9.4 h
 $\beta^+ 4.15$ K $\gamma - ^{67}\text{Ga}$ 78 h K $\gamma - ^{68}\text{Ga}$ 68 m
 $\beta^+ 1.88$ γ K ^{69}Ga 60.1% $\sigma = 1.9 - ^{70}\text{Ga}$
 ^{70}Ga 21 m $\beta^+ 1.65$ $\gamma - ^{71}\text{Ga}$ 39.9% $\sigma = 4.6 - ^{72}\text{Ga}$
 ^{72}Ga 14.1 h $\beta^+ 3.17$ $\gamma - ^{73}\text{Ga}$ 5 h $\beta^+ 1.4$ γ

32 Ge $\sigma_t = 2.3$
 ^{66}Ge 2.5 h K $\beta^+ (?) - ^{67}\text{Ge}$ 19 m $\beta^+ 3.4$ $\gamma -$
 ^{68}Ge 250 d K ^{69}Ge 40 h K $\beta^+ 1.21$ $\gamma -$
 ^{70}Ge 20.5% $\sigma = 3.4 - ^{71}\text{Ge}$ 12 d K ^{72}Ge
 ^{72}Ge 27.4% $\sigma = 1.0 - ^{73}\text{Ge}$ 7.8% $\sigma = 14$ ^{73}Ge
 ^{73}Ge IT 0.054 $\gamma - ^{74}\text{Ge}$ 36.5 $\sigma = (0.2 + 0.5)$
 ^{75}Ge 49 s IT 0.14 ^{75}Ge 82 m $\beta^+ 1.15$
 $\gamma - ^{76}\text{Ge}$ 7.8% $\sigma = (0.015 + 0.30) - ^{77}\text{Ge}$ 52 s
 $\beta^+ 2.9$ IT 0.16 $\gamma - ^{77}\text{Ge}$ 12 h $\beta^+ 2.2$ $\gamma -$
 ^{79}Ge 86 m $\beta^+ 0.9$ γ

33 As $\sigma_t = 4.3$
 ^{68}As ~ 7 m $\beta^+ - ^{69}\text{As}$ 15 m $\beta^+ 2.9$ $\gamma - ^{70}\text{As}$
 ^{70}As 50 m $\beta^+ 2.5$ $\gamma - ^{71}\text{As}$ 62 h $\beta^+ 0.81$ $\gamma - ^{72}\text{As}$
 ^{72}As 26 h K $\beta^+ 3.34$ $\gamma - ^{73}\text{As}$ 76 d K (e) $\gamma -$
 ^{74}As 17 d K $\beta^+ 1.36$ $\beta^+ 1.53$ $\gamma - ^{75}\text{As}$ 106%
 $\sigma = 4.3 - ^{76}\text{As}$ 26.7 h $\beta^+ 2.96$ $\gamma - ^{77}\text{As}$ 39 h
 $\beta^+ 0.69$ $\gamma - ^{78}\text{As}$ 90 m $\beta^+ 4.1$ $\gamma - ^{79}\text{As}$ 9 m
 $\beta^+ 2.3$ ($\gamma 0.096$) ^{80}As ~ 36 s β^+

34 Se $\sigma_t = 13$
 ^{70}Se 44 m $\beta^+ - ^{72}\text{Se}$ 9.7 d K ^{73}Se 7.1 h
 $\beta^+ 1.65$ $\gamma - ^{73}\text{Se}$ 44 m $\beta^+ 1.7 - ^{74}\text{Se}$ 0.93%
 $\sigma = 40 - ^{75}\text{Se}$ 127 d K $\gamma - ^{76}\text{Se}$ 9.1% $\sigma = (7 +$
 $78) - ^{77}\text{Se}$ 17 s IT 0.16 $^{77}\text{Se} = 7.5\%$ $\sigma = 41$
 ^{78}Se 23.6% $\sigma = 0.4$ ^{79}Se 3.9 m IT 0.096
 $\text{e}^- - ^{79}\text{Se}$ 7 $\cdot 10^4$ y $\beta^+ 0.16 - ^{80}\text{Se}$ 49.9% $\sigma =$
 $(0.03 + 0.5) - ^{81}\text{Se}$ 57 m IT 0.103 $\text{e}^- - ^{81}\text{Se}$

18 m $\beta^+ 1.38 - ^{82}\text{Se}$ 9.0% $\sigma = (0.06 + 0.004) - ^{83m}\text{Se}$
 69 s $\beta^+ 3.4 - ^{83}\text{Se}$ 25 m $\beta^+ 1.5$ $\gamma - ^{84}\text{Se} \sim 2$ m
 β^-

^{74}Br 36 m $\beta^+ \text{K} - ^{75}\text{Br}$ 1.6 h K $\beta^+ 1.70$
 $\gamma - ^{76}\text{Br}$ 17 h $\beta^+ 3.57$ K $\gamma - ^{77}\text{Br}$ 57 h K
 $\beta^+ 0.34$ $\gamma - ^{78m}\text{Br}$ 6.4 m IT $\gamma - ^{78}\text{Br}$ < 6 m $\beta^+ 2.4$
 $- ^{79}\text{Br}$ 50.6% $\sigma = (2.9 + 8.5) - ^{80m}\text{Br}$ 4.6 h IT
 0.05 $\gamma - ^{80}\text{Br}$ 18 m $\beta^+ 2.0$ K $\beta^+ 0.86$ $\gamma -$
 ^{81}Br 49.4% $\sigma = 2.6 - ^{82}\text{Br}$ 35.9 h $\beta^+ 0.46$ $\gamma -$
 ^{83}Br 2.3 h $\beta^+ 0.94$ $\gamma - ^{84}\text{Br}$ 32 m $\beta^+ 4.68$
 $\gamma - ^{85}\text{Br}$ 3.0 m $\beta^+ 2.5 - ^{86}\text{Br}$ 56 s $\beta^+ 8.0$ $\gamma -$
 ^{88}Br 16 s $\beta^- - ^{89}\text{Br}$ 4.5 s β^-

^{81}Rb 4.7 h K $\beta^+ 1.0$ $\gamma - ^{82m}\text{Rb}$ 6.3 h K
 $\beta^+ 0.77$ $\gamma - ^{83}\text{Rb}$ 75 s $\beta^+ 3.2 - ^{83}\text{Rb}$ 83 d K
 $\gamma - ^{84m}\text{Rb}$ 21 m IT 0.46 K $\gamma - ^{84}\text{Rb}$ 33 d
 K $\beta^+ 1.7$ γ $\beta^- 0.4 - ^{85}\text{Rb}$ 72.2% $\sigma = (0.05 +$
 $0.8) - ^{86m}\text{Rb}$ 1 m IT 0.56 $- ^{86}\text{Rb}$ 18.6 d
 $\beta^+ 1.77$ $\gamma - ^{87}\text{Rb}$ 27.8% 4.3 $\cdot 10^{10}$ y $\beta^+ 0.27$
 $\sigma = 0.14 - ^{88}\text{Rb}$ 18 m $\beta^+ 5.2$ γ $\sigma = < 200 - ^{89}\text{Rb}$
 15 m $\beta^+ 3.9$ $\gamma - ^{90}\text{Rb}$ 2.7 m $\beta^+ 5.7$ $\gamma - ^{91m}\text{Rb}$
 1.7 m $\beta^+ 4.6$ $\beta - ^{91}\text{Rb}$ 14 m $\beta^+ 3.0$ $\gamma - ^{92}\text{Rb}$
 ~ 80 s β^-

^{81}Sr 29 m $\beta^+ - ^{82}\text{Sr}$ 26 d K ($\beta^+ 3.2$) $- ^{83}\text{Sr}$
 33 h $\beta^+ 1.2$ K $\gamma - ^{84}\text{Sr}$ 0.55% $\sigma = 1 - ^{85m}\text{Sr}$
 70 m IT γ $\gamma - ^{85}\text{Sr}$ 65 d $\text{K} - \gamma - ^{86}\text{Sr}$ 9.8%
 $\sigma = (1.3 + ?) - ^{87m}\text{Sr}$ 2.8 h IT 0.39 $- ^{87}\text{Sr}$ 7.0%
 $- ^{88}\text{Sr}$ 82.7% $\sigma = 0.005 - ^{89m}\text{Sr}$ ~ 10 d IT $\gamma -$
 ^{89}Sr 54 d $\beta^+ 1.48$ ($\gamma 0.91$) $\sigma = < 130 - ^{90}\text{Sr}$
 28 y $\beta^+ 0.54$ $\sigma = 1 - ^{91}\text{Sr}$ 9.7 h $\beta^+ 2.67$ $\gamma -$
 ^{92}Sr 2.7 h $\beta^- \sim 0.05$ $\gamma - ^{93}\text{Sr}$ 7 m $\beta^- - ^{94}\text{Sr}$
 ~ 2 m β^-

^{82}Y 70 m $\beta^+ 2 - ^{83}\text{Y}$ 3.5 h $- ^{84}\text{Y}$ 3.7 h $- \beta^+ 2.0$
 K $\gamma - ^{85}\text{Y}$ 5 h $- ^{86}\text{Y}$ 15 h $\beta^+ 1.80$ $\gamma - ^{87m}\text{Y}$
 14 h IT ^{87}Y 80 h K $\beta^+ 0.7$ $\gamma - ^{88}\text{Y}$ 105 d
 K $\beta^+ 0.83$ $\gamma - ^{89m}\text{Y}$ 16 s $\text{IT} - ^{89}\text{Y}$ 100%
 $\sigma = 1.3 - ^{90}\text{Y}$ 64.0 h $\beta^+ 2.27$ $\sigma = 6 - ^{91m}\text{Y}$
 50 m $\text{IT} - ^{91}\text{Y}$ 58 d $\beta^+ 1.54$ $\gamma - ^{92}\text{Y}$ 3.5 h
 $\beta^+ 3.60$ $\gamma - ^{93}\text{Y}$ 10 h $\beta^+ 3.1$ $\gamma - ^{94}\text{Y}$ 17 m
 $\beta^+ 5.4$ $\gamma - ^{95}\text{Y}$ 10 m β^-

^{86}Zr ~ 17 h K $\gamma - ^{87}\text{Zr}$ 1.6 h $\beta^+ 2.10$ K $\gamma - ^{88}\text{Zr}$
 85 d K $\gamma - ^{89m}\text{Zr}$ 4.4 m IT $\beta^+ 2.4$ $\gamma - ^{89}\text{Zr}$
 79 h K $\beta^+ 0.90$ (γ) $- ^{90m}\text{Zr}$ 0.8 s $\text{IT} - ^{90}\text{Zr}$
 51.5% $\sigma = 0.1 - ^{91}\text{Zr}$ 11.2% $\sigma = 1 - ^{92}\text{Zr}$ 17.1%
 $\sigma = 0.2 - ^{93}\text{Zr}$ 9 $\cdot 10^3$ y $\beta^+ 0.063$ (γ) $\sigma = < 5 - ^{94}\text{Zr}$
 17.4% $\sigma = 0.1 - ^{95}\text{Zr}$ 65 d $\beta^+ 0.38$ $\gamma - ^{96}\text{Zr}$
 2.8% $\sigma = 0.1 - ^{97}\text{Zr}$ 17 h $\beta^+ 1.91$ γ

^{89m}Nb ~ 2 h $\beta^+ (\gamma) - ^{89}\text{Nb}$ 1.9 h $\beta^+ 2.9 - ^{90m}\text{Nb}$
 24 s $\text{IT} - ^{90}\text{Nb}$ 14.6 h $\beta^+ 1.50$ $\gamma - ^{91m}\text{Nb}$ 62 d
 IT K $\gamma - ^{91}\text{Nb}$ long $\text{K} - ^{92m}\text{Nb}$ 13 h K
 $\gamma - ^{92}\text{Nb}$ 10 d K $\gamma - ^{93m}\text{Nb}$ 3.7 y $\text{IT} - ^{93}\text{Nb}$
 100% $\sigma = (1 + ?) - ^{94m}\text{Nb}$ 6.6 m IT $\beta^+ 1.3$ $\gamma -$
 ^{94}Nb 20.000 y $\beta^+ 0.5$ γ $\sigma = 15 - ^{95m}\text{Nb}$ 84 h
 $\text{IT} - ^{95}\text{Nb}$ 35 d $\beta^+ 0.16$ $\gamma - ^{96}\text{Nb}$ 23 h $\beta^+ 0.7$
 $\gamma - ^{97m}\text{Nb}$ 1 m $\text{IT} - ^{97}\text{Nb}$ 72 m $\beta^+ 1.27$ γ
 $- ^{98}(\gamma)\text{Nb}$ 30 m $\beta^- - ^{99}\text{Nb}$ 2.5 m $\beta^+ 3.2$

^{90}Mo 5.7 h K $\beta^+ 1.2$ $\gamma - ^{91m}\text{Mo}$ 66 s IT
 $\beta^+ 3.99$ $\gamma - ^{91}\text{Mo}$ 15.6 m $\beta^+ 3.44 - ^{92}\text{Mo}$ 15.7%
 $\sigma = (< 0.006 + ?) - ^{93m}\text{Mo}$ 6.9 h IT $\gamma - ^{93}\text{Mo}$ > 2 y
 $\text{K} - ^{94}\text{Mo}$ 9.3% $- ^{95}\text{Mo}$ 15.7% $\sigma = 14 - ^{96}\text{Mo}$
 16.5% $\sigma = 1 - ^{97}\text{Mo}$ 9.5% $\sigma = 2 - ^{98}\text{Mo}$ 23.8%
 $\sigma = 0.13 - ^{99}\text{Mo}$ 67 h $\beta^+ 1.23$ $\gamma - ^{100}\text{Mo}$ 9.5%
 $\sigma = 0.2 - ^{101}\text{Mo}$ 15 m $\beta^+ 2.2$ $\gamma - ^{102}\text{Mo}$ 11 m
 $\beta^+ 1 - ^{103}\text{Mo}$ < 2 m β^-

^{94}Ru 0.9 m $\beta^+ \gamma - ^{94}\text{Ru}$ 1 h $\text{K} - ^{95}\text{Ru}$
 98 m K $\beta^+ 1.2$ $\gamma - ^{96}\text{Ru}$ 5.6% $\sigma = 0.01$
 $- ^{97}\text{Ru}$ 2.9 d K $\gamma - ^{98}\text{Ru}$ 1.9% $- ^{99}\text{Ru}$ 12.7%
 $- ^{100}\text{Ru}$ 12.7% $- ^{101}\text{Ru}$ 17.0% $- ^{102}\text{Ru}$ 31.5%
 $\sigma = 1.2 - ^{103}\text{Ru}$ 40 d $\beta^+ 0.69$ $\gamma - ^{104}\text{Ru}$ 18.6%
 $\sigma = 0.7 - ^{105}\text{Ru}$ 45 h $\beta^+ 1.15$ $\gamma - ^{106}\text{Ru}$ 1.0 y
 $\beta^+ 0.04$ (3.53) $\gamma - ^{107}\text{Ru}$ (4.5 m $\beta^+ 4.3$ $\gamma - ^{108}\text{Ru}$
 ~ 4 m β^-

^{97}Rh 35 m $\beta^+ - ^{98}\text{Rh}$ 9 m $\beta^+ 3.3$ $\gamma - ^{99m}\text{Rh}$
 15 $\beta^+ \gamma$ ^{99}Rh 4.5 h $\beta^+ 0.74$ $\gamma - ^{100}\text{Rh}$ 21 h
 $\beta^+ 2.62$ K $\gamma - ^{101m}\text{Rh}$ ~ 5 y IT $\gamma - ^{101}\text{Rh}$
 4.5 d K $\gamma - ^{102}\text{Rh}$ 220 d K $\beta^+ 1.15$ $\beta^+ 1.24$
 $\gamma - ^{103}\text{Rh}$ 100% $\sigma = (12 + 138) - ^{103m}\text{Rh}$ 54 m
 IT ^{104m}Rh 4.4 m IT γ $\beta^- - ^{104}\text{Rh}$ 42 s
 $\beta^+ 2.5$ $\gamma - ^{105m}\text{Rh}$ 30 s $\text{IT} - ^{105}\text{Rh}$ 36 s β^-
 0.56 $\gamma - ^{106m}\text{Rh}$ 2 h $\beta^- \sim 1$ $\gamma - ^{106}\text{Rh}$ 30 s
 $\beta^+ 3.53$ $\gamma - ^{107}\text{Rh}$ 22 m $\beta^- \sim 2$ $\gamma - ^{108}\text{Rh}$ 18 s
 $\beta^- \sim 4$ $\gamma - ^{109}\text{Rh}$ < 1 h $\gamma - ^{110}\text{Rh}$

53	I	119I 13m β^- 120I $> 1.3\text{h}$ β^+ 4.0- 121I 1.4h β^+ 1.13 γ - 122I 3.5m β^+ 3.12 123I -13h K γ - 124I 4.5d K β^+ 2.20 γ - 125I 60d K γ - 126I 13.3d K β^+ 0.87 β^+ 1.11 γ - 127I 100% $\sigma = 6.3$ - 128I 25.0m β^+ 2.12 K γ - 129I 1.7-10 ⁷ y β^- 0.15 γ $\sigma = 30$ - 130I 12.6h β^+ 1.02 γ - 131I 8.05d β^+ 0.91 γ $\sigma \sim 600$ - 132I 2.3h β^+ 2.12 γ - 133I 21h β^+ 1.3 γ - 134I 52m β^+ 2.5 γ - 135I 6.7h β^+ 1.4 γ - 136I 86s β^+ 6.4 γ - 137I 22s β^+ - 138I 5.9s β^- - 139I 2.7s β^-
	$\sigma_t = 6.3$	

55	Cs	123Cs 6m β^+ - 124Cs 45m K β^+ 2.05 γ - 125Cs 1.6m β^+ 3.8 K γ - 126Cs 6.2h K β^+ 1.06 γ - 127Cs 3.8m β^+ 3.0 γ - 128Cs 31h K γ - 129Cs 30m β^+ 1.97 K β^+ 0.44- 131Cs 9.7d K L- 132Cs 6.2d K γ - 133Cs 100% $\sigma = (0.016 + 31)$ - 134Cs 31h-IT β^- 0.55 γ - 135Cs 2.3y β^- 0.65 γ - 136Cs 2.0-10 ⁶ y β^- 0.21 $\sigma \sim 15$ - 137Cs 13d β^- 0.66 γ - 138Cs 30y β^- 1.13 (?) $\sigma = < 2$ - 139Cs 32m β^- 3.40 γ - 140Cs 9.5m β^- ~ 4 γ - 141Cs 66s β^- - 142Cs $\sim 1\text{m}$ - β^-
	$\sigma_t = 31$	

56	Ba	126Ba 97m K (β^+ 3.8) γ - 127Ba $\sim 12\text{m}$ - 128Ba 2.4d K (β^+ 3.0) γ - 129Ba 1.9h β^+ 1.6 γ - 130Ba 0.101% $\sigma = 6$ - 131Ba 11.6d K γ - 132Ba 0.097% $\sigma = 3$ - 133Ba 39h IT- 134Ba 8y K γ - 135Ba 2.42% $\sigma = < 4$ - 136Ba 29h IT- 137Ba 6.6% $\sigma = 5$ - 138Ba 7.8% $\sigma = < 1$ - 139Ba 2.60m IT- 140Ba 11.3% $\sigma = 4$ - 141Ba 71.7% $\sigma = 0.55$ - 142Ba 85m β^+ 2.38 γ $\sigma = 4$ - 143Ba 12.8d β^+ 1.02 γ - 144Ba 18m β^+ 2.8 γ - 145Ba 6m β^- - 146Ba $< 0.5\text{m}$ β^-
	$\sigma_t = 1.2$	

57	La	131La 58m β^+ 1.6- 132La 4.5h β^+ 3.5 γ - 133La 4h K β^+ 1.2 γ - 134La 6.5m K β^+ 2.7- 135La 19h K γ - 136La 9m K β^+ 2.1- 137La $> 10^5\text{y}$ - 138La 0.089% $2 \cdot 10^{11}\text{y}$ K β^+ 1.0 γ - 139La 99.911% $\sigma = 8.9$ - 140La 40.2h β^+ 2.15 γ $\sigma = 3$ - 141La 3.8h β^+ 2.43 γ - 142La 77m β^- > 2.5 γ - 143La $\sim 19\text{m}$ β^-
	$\sigma_t = 8.9$	

58	Ce	133Ce 63h K β^+ 1.3 γ - 134Ce 72h K- 135Ce 22h K β^+ 0.8- 136Ce 0.19% $\sigma = (2x \sim 20)$ - 137Ce 35h IT- 138Ce 9h K γ - 139Ce 0.26% $\sigma = 1$ - 140Ce 140d K γ - 141Ce 88.47% $\sigma = 0.6$ - 142Ce 32d β^- 0.57 γ - 143Ce 11.08% $\sigma = 1$ - 144Ce 33h β^- 1.38 γ $\sigma = 6$ - 145Ce 263d β^- 0.30 γ - 146Ce 3.0m β^- 2.0 γ - 147Ce 14m β^- 0.7 γ
	$\sigma_t = 0.7$	

59	Pr	135Pr 22m β^+ 2.5 γ - 136Pr 70m β^+ 2.0 γ - 137Pr 2.0h β^+ 1.4 γ - 138Pr 4.5h- β^+ 1.0 γ - 140Pr 3.4m β^+ 2.3 K- 141Pr 100% $\sigma = 11$ - 142Pr 19.1h β^+ 2.16 γ - 143Pr 13.8d β^- 0.92- 144Pr 17m β^- 2.98 γ - 145Pr 5.9h β^- 1.7 γ - 146Pr 24m β^- 3.7 γ
	$\sigma_t = 11$	

60	Nd	138Nd 22m β^+ 2.4- 139Nd 5.5h K β^+ 3.1 γ - 140Nd 3.3d K- 141Nd 2.4h K β^+ 0.7 γ - 142Nd 27.1% $\sigma = 17$ - 143Nd 12.2% $\sigma = 320$ - 144Nd 23.9% $\sim 2 \cdot 10^{15}\text{y}$ $\sigma = 1.8$ $\sigma = 5$ - 145Nd 8.3% $\sigma = 44$ - 146Nd 17.2% $\sigma = 2$ - 147Nd 11.6d β^- 0.81 γ - 148Nd 5.7% $\sigma = 4$ - 149Nd 1.8h β^- 1.5 γ - 150Nd 5.6% $\sigma = 3$ - 151Nd 15m β^- 1.9 γ
	$\sigma_t = 43$	

62	Sm	143Sm 8m β^+ 2.3- 144Sm 3.1% $\sigma \sim 0.03$ - 145Sm 1.0y K γ - 146Sm $\sim 3 \cdot 10^7\text{y}$ $\sigma = 2.5$ - 147Sm 1.3- 10^{11}y $\alpha = 2.18$ 15.0%- 148Sm 11.2%- 149Sm 13.8% $\sigma = 66,000$ - 150Sm 7.4% $\sigma_t = 10,000$ 80y β^- 0.076 γ $\sigma = 12,000$ - 151Sm 26.8% $\sigma = 140$ - 152Sm 47h β^- 0.81 γ - 153Sm 22.7% $\sigma = 5$ - 154Sm 23m β^- 1.8 γ - 155Sm $\sim 10\text{h}$ β^- 0.9
	$\sigma_t = 10,000$	

63	Eu	144Eu 18m β^+ 2.4- 145Eu 5d K- 146Eu 38h K- 147Eu 24d K γ $\alpha = 2.9$ - 148Eu 58d K γ - 149Eu 120d K γ - 150Eu 14h β^- 1.1- 151Eu 47.8% $\sigma = (1400 + 7200)$ - 152Eu 9.3h β^- 1.88 K γ - 153Eu 13y-K- β^- 0.70 γ $\sigma = 5000$ - 154Eu 52.2% $\sigma = 400$ - 155Eu 16y β^- 1.5 γ $\sigma = 1400$ - 156Eu 1.7y β^- 0.25 $\sigma = 13,000$ - 157Eu 15d β^- 2.4 γ - 158Eu 15h β^- ~ 1.7 γ - 159Eu 60m β^- 2.6 γ - 160Eu 20m β^-
	$\sigma_t = 4,300$	

46 Pd $Q_1 = 8$

^{98}Pd 17m β^+ - ^{99}Pd 24m γ - ^{100}Pd 4.0 d
 K γ - ^{101}Pd 8h K β^+ 2.3 γ - ^{102}Pd 1.0%
 $\sigma = 4.8$ - ^{103}Pd 17d K γ - ^{104}Pd 11.0%
 ^{105m}Pd 23s IT- ^{105}Pd 22.2% ^{106}Pd 27.3%
 ^{107}Pd 7.10 ^{5} y β 0.04- ^{108}Pd 26.7% σ
 (0.07+11)- ^{110}Pd 4.8m IT- ^{109}Pd 13.6h
 β 1.0 (γ)- ^{110}Pd 11.8% σ =(2+0.4)- ^{111m}Pd
 5.5h IT β γ - ^{111}Pd 22m β 2.14 γ -
 ^{112}Pd 21h β 0.28 γ - ^{113}Pd 1.5m β

47 Ag $Q_1 = 60$

^{102}Ag 16m β^+ - ^{103}Ag 1.1h β^+ 1.3 K γ
 ^{104}Ag 27m β^+ 2.70 γ - ^{105}Ag 40d K
 γ - ^{106m}Ag 24m β^+ 1.96 K γ - ^{106}Ag 8.3 d
 K γ - ^{107m}Ag 44s IT- ^{107}Ag 51.4% σ =30
 ^{108}Ag 2.3m β 1.77 K β^+ 0.80 γ - ^{109m}Ag
 40s IT- ^{109}Ag 48.6% σ =(2+82)- ^{110m}Ag
 270d β 0.53 IT γ - ^{110}Ag 24s β 2.88 γ -
 ^{111m}Ag 75s IT- ^{111}Ag 7.5d β 1.04 γ -
 ^{112}Ag 3.12h β 4.1 γ - ^{113}Ag 5.3h β 2.0
 γ - ^{114}Ag 2m β - ^{115}Ag 21m β 3 γ

48 Cd $Q_1 = 3,300$

^{104}Cd 59m K γ - ^{105}Cd 55m K β^+ 1.69
 γ - ^{106}Cd 1.22% σ =1- ^{107}Cd 6.7h K
 β^+ 0.32 γ - ^{108}Cd 0.88%- ^{109}Cd 1.3y K L
 (γ)- ^{110}Cd 12.4% σ =(0.2+?) ^{111m}Cd 49m
 IT γ - ^{111}Cd 12.8%- ^{112}Cd 24.0% σ =(0.03+?)
 ^{113m}Cd 5y β 0.58- ^{113}Cd 12.3% σ =27,000
 ^{114}Cd 26.8% σ =(0.14+1.1)- ^{115m}Cd 43d
 β 1.63 γ - ^{115}Cd 54h β 1.11 γ - ^{116}Cd 7.6%
 σ =1.4- ^{117m}Cd 3.0h IT- ^{117}Cd 50m β 3.0
 γ - ^{118}Cd ~30m (β 4)

49 In $Q_1 = 190$

^{107}In 30m β^+ 2 γ - ^{108}In 50m β^+ 2.3-
 ^{109}In 4.3h K β^+ 0.7 γ - ^{110m}In 5.0h K
 IT γ - ^{110}In 66m β^+ 2.25 K γ - ^{111}In
 2.80d K γ - ^{112m}In 21m IT (γ)- ^{112m}In
 25s IT- ^{112}In 14m β 0.66 K β^+ 1.52-
 ^{113}In 4.2% σ =(61+2)- ^{113m}In 1.73h IT-
 ^{114m}In 49d IT K γ - ^{114}In 72s β 1.98
 K β ~1 γ - ^{115m}In 4.5h IT β 0.83-
 ^{115}In 95.8% 6.10 ^{14} y β 0.6 σ =(145+52)-
 ^{116m}In 54.0m β 1.00 γ - ^{116}In 13s β 3.3
 ^{117m}In 1.9h β 1.77 IT γ - ^{117}In 1.1h
 β 0.74 γ - ^{118m}In 4.5m β 1.5 γ - ^{118}In
 γ - ^{119}In 18m β 7.7

50 Sn $Q_1 = 0.6$

^{108}Sn 4h K- ^{109}Sn 18m K β^+ γ - ^{110}Sn
 4h K γ - ^{111}Sn 35m K β^+ 1.51- ^{112}Sn
 1.02% σ =1.3- ^{113}Sn 112d K L γ - ^{114}Sn
 0.6% ^{115}Sn 0.38%- ^{116}Sn 14.3% σ =3,000+?
 ^{117m}Sn 14d IT γ - ^{117}Sn 7.6%- ^{118}Sn
 24.1% σ =(0.01+?) ^{119m}Sn 275d IT γ -
 ^{119}Sn 8.5%- ^{120}Sn 32.5% σ =(~0.001+0.1)-
 ^{121m}Sn >1y β 0.42- ^{121}Sn 27h β 0.38-
 ^{122}Sn 4.8% σ =(0.001+0.2)- ^{123m}Sn 130d
 β 1.42- ^{123}Sn 40m β 1.26 γ - ^{124}Sn 6.1%
 σ =(0.2+0.004)- ^{125m}Sn 9.5m β 2.1 γ - ^{125}Sn
 10d β 2.4 γ - ^{126}Sn 50m β - ^{127}Sn 1.5h
 β - ^{130}Sn 2.6m β - ^{131}Sn 3.4m β - ^{132}Sn
 2.2m β

51 Sb $Q_1 = 5.5$

^{116m}Sb 15m β^+ 2.4 γ - ^{116}Sb 60m β^+ 1.4
 γ - ^{117}Sb 2.8h K γ - ^{118m}Sb 3.5m β^+ 3.1
 IT- ^{118}Sb 5.1h K β^+ 0.7 γ - ^{119}Sb 38h
 K γ - ^{120m}Sb 5.8d K γ - ^{120}Sb 17m β^+
 1.70 γ - ^{121}Sb 57% σ =7.0- ^{122m}Sb 3.5m
 IT γ - ^{122}Sb 2.8d β 1.98 K β^+ 0.5 γ -
 ^{123}Sb 43% σ =(0.03+0.03+3.4)- ^{124m}Sb 21m
 IT β - ^{124m}Sb 1.3m β 3 IT- ^{124}Sb 60d
 β 2.31 γ - ^{125}Sb 2.7y β 0.62 γ - ^{126m}Sb 9h
 β 1.12 γ - ^{126}Sb 28d β 1.9- ^{127}Sb 93h β 1.57
 γ - ^{128}Sb ~1h β - ^{129}Sb 4.6h β 1.70 γ
 ^{130m}Sb 10m β 2.9 γ - ^{130}Sb 40m β γ
 ^{131}Sb 22m β 1.1- ^{132}Sb 2m β - ^{133}Sb
 4.1m β - ^{134}Sb 0.8m β

52 Te $Q_1 = 4.6$

^{116}Te ~3h (β^+ 2.4)- ^{117}Te 2.5h β^+ 2.5-
 ^{118}Te 60d K (β^+ 3.1) (γ)- ^{119m}Te 16h K
 γ - ^{119}Te 4.5d K γ - ^{120}Te 0.091% σ =
 <140 - ^{121m}Te 150d IT γ - ^{121}Te 17d K
 γ - ^{122}Te 2.5% σ =(1+2)- ^{123m}Te 104d IT
 γ - ^{123}Te 0.88% σ =400- ^{124}Te 4.6% σ =
 (5+2)- ^{125m}Te 58d IT γ - ^{125}Te 7.0%
 σ =1.5- ^{126}Te 18.7% σ =(0.09+0.8)- ^{127m}Te
 110d IT- ^{127}Te 9.3h β 0.68- ^{128}Te 31.8%
 σ =(0.016+0.14)- ^{129m}Te 33d IT- ^{129}Te 72m
 β 1.46 γ - ^{130}Te 34.4% σ =(0.01+0.2)- ^{131m}Te
 30h β 2.5 IT γ - ^{131}Te 25m β 2.1 γ -
 ^{132}Te 77h β 0.22 γ (β 2.1) (γ)- ^{133m}Te
 63m IT- ^{133}Te 2m β 2.4 γ - ^{134}Te 44m
 β

64	Gd	^{148}Gd >35 α 3.2 ^{149}Gd 9 d K γ α 3.0 ^{150}Gd $>10^5$ y α 2.7 ^{151}Gd ~ 150 d K γ ^{152}Gd 0.20% $\sigma = <180 - 153\text{Gd}$ 236 d K ^{154}Gd 2.15% ^{155}Gd 14.7% $\sigma = \sim 70,000 -$ ^{156}Gd 20.5% ^{157}Gd 15.7% $\sigma = \sim 180,000 -$ ^{158}Gd 24.9% $\sigma = 4 - 159\text{Gd}$ 18 h β 0.95 γ ^{160}Gd 21.9% $\sigma = 0.8$ ^{161}Gd 3.7 m β 1.6 γ $\sigma_t = 38,000$
65	Tb	^{149}Tb 4.1 h α 3.95 K ^{150}Tb 19 h K α 3.4 ^{153}Tb 5.1 d K γ ^{154m}Tb 7 h K β ? ^{154}Tb 17.2 h K β^+ 2.75 γ ^{156m}Tb 5 h β 0.14 ^{156}Tb 5 d K β 0.6 γ ^{159}Tb 100% $\sigma = 45 - 160\text{Tb}$ 72 d β 0.85 γ $\sigma = \sim 600 -$ ^{161}Tb 7 d β 0.55 γ ^{162}Tb 14 m $\sigma_t = 45$
66	Dy	^{156}Dy 0.052% ^{157}Dy 8.2 h K γ ^{158}Dy 0.090% ^{159}Dy 134 d K L ^{160}Dy 2.29% ^{161}Dy 18.9% ^{162}Dy 25.5% ^{163}Dy 25.0% ^{164}Dy 28.2% $\sigma = 2700 - 165m\text{Dy}$ 1.3 m IT $\beta \sim 1$ γ ^{165}Dy 2.32 h β 1.25 γ $\sigma = 4700$ ^{166}Dy 82 h β 0.3 γ
67	Ho	^{160}Ho 5.0 h γ K ^{161}Ho 2.5 h K γ ^{162}Ho 22 m K β^+ 1.3 γ ^{164}Ho 37 m K β 0.09 IT γ ^{165}Ho 100% $\sigma = (>0.007+64)$ ^{166m}Ho >30 y β 0.2 γ ^{166}Ho 27.2 h β 1.85 γ ^{167}Ho 3.0 h β 1.0 γ ^{169}Ho 1.6 h β
68	Er	^{160}Er 29 h K ^{161}Er 3 h K β^+ 1.2 γ ^{162}Er 0.136% ^{163}Er 75 m K γ ^{165}Er ^{156}Er ^{165}Er 10 h K ^{166}Er 33.4% ^{167}Er 22.9% ^{168}Er 27.1% $\sigma = 2 - 169\text{Er}$ 9.4 d β 0.33 ^{170}Er 14.9% $\sigma = 9 - 171\text{Er}$ 7.5 h β 1.48 γ
69	Tm	^{165}Tm 25 h K γ ^{166}Tm 7.7 h K β^+ 2.1 γ ^{167}Tm 9.6 d K γ ^{168}Tm 87 d K γ ^{169}Tm 100% $\sigma = 125 -$ ^{170}Tm 129 d β 0.97 γ $\sigma = \sim 2000 - 171\text{Tm}$ 1.9 y β 0.10 ^{172}Tm 19 m β ^{174}Tm ~ 2 d β

70	Yb	^{166}Yb 54 d K γ ^{167}Yb 18 m K γ ^{168}Yb 0.14% $\sigma = 11,000 - 169\text{Yb}$ 32 d K γ ^{170}Yb 3.03% ^{171}Yb 14.3% ^{172}Yb 21.8% ^{173}Yb 16.2% ^{174}Yb 31.8% $\sigma = \sim 60 - 175\text{Yb}$ 4.2 d β 0.47 γ ^{176}Yb 12.7% $\sigma = 7 - 177\text{Yb}$ 2.0 h β 1.30 γ $\sigma_t = 37$
71	Lu	^{170}Lu 1.7 d K γ ^{171m}Lu 8.5 d K γ ^{171}Lu 1.6 y γ K γ ^{172m}Lu 4.0 h β^+ 1.2 ^{172}Lu 6.7 d K γ ^{173}Lu 1.4 y K γ ^{174}Lu 165 d K β 0.6 γ ^{175}Lu 97.40% $\sigma = (18+?) - 176m\text{Lu}$ 3.7 h β 1.2 γ ^{176}Lu 2.60% $3 \cdot 10^{10}$ y β^+ 0.42 K γ $\sigma = 3,200 - 177\text{Lu}$ 6.8 d β 0.50 γ ^{178}Lu 22 m β ^{179}Lu ~ 5 h β
72	Hf	^{170}Hf 1.8 h β^+ 2.4 ^{171}Hf 16 h K γ ^{172}Hf ~ 5 y K γ ^{173}Hf 24 h K γ ^{174}Hf 0.18% $\sigma = \sim 1000 - 175\text{Hf}$ 70 d K γ ^{176}Hf 5.2% ^{177}Hf 18.5% $\sigma = 370 - 178\text{Hf}$ 27.1% $\sigma = <30 - 179m\text{Hf}$ 19 s IT γ ^{179}Hf 13.8% $\sigma = 80 - 180m\text{Hf}$ 5.5 h IT γ ^{180}Hf 35.2% $\sigma = 65 - 181\text{Hf}$ 46 d β 0.41 γ
73	Ta	^{176}Ta 8.0 h K γ ^{177}Ta 2.2 d K γ ^{178m}Ta 9.3 m K β^+ 1.1 γ ^{178}Ta 2.1 h K β^+ ~ 1 γ ^{179}Ta ~ 600 d K γ ^{180m}Ta 8.1 h K β 0.70 γ ^{180}Ta 0.012% ^{181}Ta 99.988 $\sigma = (0.07+22) - 182m\text{Ta}$ 16 m IT β ? ^{182}Ta 112 d β 0.51 γ $\sigma = 20,000 - 183\text{Ta}$ 5.2 d β 0.62 γ ^{184}Ta 8.7 h β 1.26 γ ^{185}Ta 49 m β 1.7 γ ^{186}Ta 10 m β 2.2 γ
74	W	^{176}W 1.3 h K β^+ ~ 2 γ ^{177}W 2.2 h K γ ^{178}W 21 d K γ ^{179}W 30 m K ^{180}W 0.14% ^{181}W α 3 (?) $\sigma = <20 - 181\text{W}$ 140 d K L γ ^{182}W 26.2% $\sigma = (0.5+20) - 183m\text{W}$ 5.5 s IT γ ^{183}W 14.3% σ 11 ^{184}W 30.7% $\sigma = 2.0 - 185m\text{W}$ 1.7 m IT γ ^{185}W 74 d β 0.43 γ ^{186}W 28.7% $\sigma = 36 - 187\text{W}$ 24 h β 1.31 γ $\sigma = \sim 80 - 188\text{W}$ 65 d β

75	Re	$Q_1 = 86$	^{180}Re 2.4 m $\beta^{1.1}$ γ - ^{182m}Re 13 h K γ - ^{182}Re 64 h K γ - ^{183}Re 150 d K γ - ^{184m}Re 50 d K γ - ^{184}Re 2.2 d K γ - ^{185}Re 37.1% $\sigma = 105$ - ^{186}Re 91 h $\beta^{1.07}$ K γ - ^{187}Re 62.9% $\sim 5 \cdot 10^{10}$ y $\beta^- < 0.008$ $\sigma = 75$ - ^{188m}Re 20 m IT γ - ^{188}Re 17 h $\beta^{2.12}$ γ $\sigma < 3$ - ^{189}Re ~ 200 d $\beta^{0.2}$ γ - ^{190}Re 3 m $\beta^{1.7}$ γ - ^{191}Re 10 m $\beta^{1.8}$
76	Os	$Q_1 = 15$	^{178}Os 24 h K- ^{183m}Os 10 h K γ - ^{183}Os 15 m K γ - ^{184}Os 0.018% $\sigma \sim 20$ - ^{185}Os 95 d K L γ - ^{186}Os 1.59% $\sigma = 187m$ Os 35 h IT- ^{187}Os 1.64%- ^{188}Os 13.3% ^{189}Os 16.1%- ^{190m}Os 9 m IT γ - ^{190m}Os 6 h IT- ^{190}Os 26.4% $\sigma = 8$ - ^{191m}Os 14 h IT- ^{191}Os 16 d $\beta^{0.14}$ γ - ^{192}Os 41.0% $\sigma = 1.6$ - ^{193}Os 31 h $\beta^{1.10}$ γ $\sigma = 200$ - ^{194}Os ~ 2 y β^-
77	Ir	$Q_1 = 460$	^{187}Ir 12 h K $\beta^{2.2}$ γ - ^{188}Ir 41 h K β^+ 2 γ - ^{189}Ir 11 d K γ - ^{190m}Ir 3 h K $\beta^{2.0}$ γ - ^{190}Ir 11 d K γ - ^{191m}Ir 5 s IT γ - ^{191}Ir 38.5% $\sigma = (250 + 750)$ - ^{192m}Ir 1.4 m IT β^- - ^{192}Ir 74 d $\beta^{0.67}$ K γ - ^{193}Ir 61.5% $\sigma = 120$ - ^{194}Ir 19 h $\beta^{2.24}$ γ - ^{195}Ir 2.3 h $\beta^{2.1}$ γ - ^{196}Ir 9.7 d $\beta^{0.08}$ γ - ^{197}Ir 7 m $\beta^{1.6}$ γ - ^{198}Ir 50 s $\beta^{3.6}$ γ
78	Pt	$Q_1 = 1$	^{187}Pt 3 h- ^{188}Pt 10 d K γ - ^{189}Pt 11 h K γ - ^{190}Pt 0.012% $\sim 10^{12}$ y(?) $\alpha 3.3$ (?) $\sigma \sim 90$ - ^{191}Pt 3.0 d K γ - ^{192}Pt 0.78% $\sigma = 8$ - ^{193m}Pt 3.4 d IT- ^{193}Pt long L- ^{194}Pt 32.8% $\sigma = 1.2$ - ^{195m}Pt ~ 6 d IT γ - ^{195}Pt 33.7% $\sigma = 27$ - ^{196}Pt 25.4% $\sigma = (\sim 0 + 1.2)$ - ^{197m}Pt 1.4 h IT- ^{197}Pt 19 h $\beta^{0.67}$ γ - ^{198}Pt 7.2% $\sigma = 4$ - ^{199}Pt 30 m $\beta^- \sim 1.2$ γ
79	Au	$Q_1 = 98$	^{187}Au ~ 15 m- ^{188}Au ~ 10 m- ^{189}Au 42 m K γ - ^{191}Au 3 h K γ - ^{192}Au 4.8 d K $\beta^{1.9}$ γ - ^{193m}Au 4 s IT γ - ^{193}Au 17 h K γ - ^{194}Au 39 h K $\beta^{1.55}$ γ - ^{195m}Au 30 s IT γ - ^{195}Au 180 d K γ - ^{196m}Au 14 h K IT- ^{196}Au 56 d K $\beta^{0.27}$ γ - ^{197m}Au 7.4 s IT γ - ^{197}Au $\sim 100\%$ $\sigma = 98$ - ^{198}Au 2.70 d $\beta^{1.37}$ γ - $\sigma = 26,000$ - ^{199}Au
80	Hg	$Q_1 = 350$	^{189}Hg 25 m β^+ K γ - ^{190}Hg 90 m K- ^{191}Hg 57 m K γ - ^{192}Hg 6 h K $\beta^{1.2}$ γ - ^{193m}Hg 12 h IT γ K- ^{193}Hg 5 h K γ ^{194}Hg ~ 130 d K- ^{195m}Hg 40 h K IT γ - ^{195}Hg 9.5 h K γ - ^{196}Hg 0.15% $\sigma = 2500$ - ^{197m}Hg 25 h IT K γ - ^{197}Hg 65 h K γ - ^{198}Hg 10.0% $\sigma = 190m$ Hg 43 m IT γ - ^{199}Hg 16.9% $\sigma = 2000$ - ^{200}Hg 23.1% $\sigma < 50$ - ^{201}Hg 13.2% $\sigma < 50$ - ^{202}Hg 29.8% $\sigma = 3$ - ^{203}Hg 48 d $\beta^{0.21}$ γ - ^{204}Hg $\sigma = 6.8$ - $\sigma = 0.4$ - ^{205}Hg -5.2 m $\beta^{1.6}$ - γ -
81	Tl	$Q_1 = 3.3$	^{185}Tl 1.2 h- ^{186}Tl ~ 4 h K γ - ^{187}Tl 2.8 h K γ - ^{188m}Tl 1.9 h K IT γ - ^{188}Tl 5 h K γ - ^{189}Tl 7.4 h K γ - ^{200}Tl 27 h K β^+ γ - ^{201}Tl 3.0 d K γ - ^{202}Tl 12 d K L γ - ^{203}Tl 29.5% $\sigma = 11$ - ^{204}Tl 4.1 y β^- 0.76 K- ^{205}Tl 70.5% $\sigma = 0.11$ - ^{206}Tl 4.20 m β^- 1.51- ^{207}Tl 4.78 m $\beta^{1.45}$ γ - ^{208}Tl 3.8 m $\beta^{1.79}$ γ - ^{209}Tl 2.2 m $\beta^{2.3}$ γ - ^{210}Tl 1.32 m $\beta^{1.9}$ γ
82	Pb	$Q_1 = 0.17$	^{197}Pb 42 m K IT(?) γ - ^{198}Pb 2.3 h K γ - ^{199m}Pb 12 m IT- ^{199}Pb 1.5 h K γ - ^{200}Pb 21 h K γ - ^{201m}Pb 1.0 m IT- ^{201}Pb 9 h K γ - ^{202m}Pb 3.5 h IT K γ - ^{203}Pb ~ 105 y L- ^{203m}Pb 6.5 IT- ^{203}Pb 52 h K γ - ^{204m}Pb 68 m IT γ - ^{204}Pb 1.3% $\sigma = 0.9$ - ^{205}Pb $> 10^6$ y L ^{206}Pb 26% $\sigma = 0.03$ - ^{207m}Pb 0.80 s IT γ - ^{207}Pb 21% $\sigma = 0.73$ - ^{208}Pb 52% $\sigma = 0.00045$ - ^{209}Pb 3.3 h $\beta^{0.62}$ - ^{210}Pb 20 y $\beta^{0.020}$ γ - ^{211}Pb 36.1 m β^- 1.4 γ - ^{212}Pb 10.64 h $\beta^{0.58}$ γ - ^{214}Pb 26.8 m $\beta^{0.7}$ γ
83	Bi	$Q_1 = 0.033$	^{198}Bi 7 m K $\alpha 5.83$ - ^{199}Bi ~ 25 m K $\alpha 5.47$ - ^{200}Bi 35 m K- ^{201m}Bi 1.0 h K $\alpha 5.15$ - ^{201}Bi ~ 2 h K- ^{202}Bi 1.6 h K- ^{203}Bi 12 h K $\alpha 4.85$ γ - ^{204}Bi 12 h K γ - ^{205}Bi 14 d K γ - ^{206}Bi 6.4 d K γ - ^{207}Bi 8.0 y K L γ - ^{208}Bi - ^{209}Bi 100% $3 \cdot 10^{17}$ y(?)

Atomic No	Total Absorption Cross Section (barn)	Stable Isotope (in italic): %, Thermal Neutrons Cross Section (barn). Radioisotopes: Period, Emissions and Energy (MeV)
		$\alpha 3$ (γ) $\sigma = 0.019 + 0.014$ — ^{210m}Bi 5.0 d β^- 1.17 α — ^{210}Bi $2.6 \cdot 10^6$ y α 4.94 β^- — ^{211}Bi 2.15 m α 6.62 β^- γ — ^{212}Bi 60.5 m β^- 2.25 α 6.09 γ — ^{213}Bi 47 m β^- 1.39 γ α 5.9 — ^{214}Bi 19.7 m β^- 3.17 α 5.5 γ — ^{215}Bi 8 m β^-
90	Th $\sigma_t = 7.5$	^{223}Th < 1 m α 7.5 — ^{224}Th < 9 m α 7.13 — ^{225}Th 8 m α 6.57 K — ^{226}Th 31 m α 6.34 γ — ^{227}Th 18.2 d α 5.97 6.03 γ $\sigma = 1500$ — ^{228}Th 1.90 y α 5.42 γ $\sigma = 120$ — ^{229}Th 7300 y α 5.02 $\sigma = \sim 45$ — ^{230}Th 80,000 y — α 4.68 γ $\sigma = 35$ — ^{231}Th 25.6 h β^- 0.30 γ — ^{232}Th 100% 1.39×10^{10} y — α 3.99 γ FS $\sigma = 7.5$ — ^{233}Th ^{233}m β^- 1.23 γ $\sigma = 1400$ — ^{234}Th 24.10 d β^- 0.19 γ $\sigma = 1.8$ — ^{235}Th < 5 m β^-
92	U $\sigma_t = 7.8$	^{227}U 1.3 m α 6.8 — ^{228}U 9.3 m α 6.67 K — ^{229}U 58 m K α 6.42 — ^{230}U 21 d α 5.89 γ $\sigma = 25$ — ^{231}U 4.3 d K α 5.45 γ $\sigma \sim 400$ ^{232}U 74 y α 5.32 γ $\sigma \sim 300$ — ^{233}U $1.62 \cdot 10^5$ y α 4.82 γ $\sigma = 60$ — ^{234}U 0.0055% $2.50 \cdot 10^5$ y α 4.76 γ FS $\sigma = 80$ — ^{235}U 0.72% $7.1 \cdot 10^8$ y α 4.58 FS γ $\sigma = 108$ — ^{236}U $2.39 \cdot 10^7$ y α 4.50 γ FS $\sigma = 8$ — ^{237}U 6.75 d β^- 0.24 γ ^{238}U 99.27% $4.51 \cdot 10^9$ y α 4.18 γ FS $\sigma = 2.8$ — ^{239}U 23.5 m β^- 1.21 γ $\sigma = 22$ — ^{240}U 14 h β^- 0.36 (γ)

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

SAYFA

Şekil 1.1	Başlıca alüminyum alaşımları.....	1
Şekil 1.2	İkili alüminyum alaşımları yoğunluğu.....	2
Şekil 2.1	Bir boyutlu problemler için koordinatlar.... a) Sınırlı ,b) Yarı sınırlı ,c) Sonsuz.....	7
Şekil 2.2	Gazların metallere kararlı difüzyonu..... durumunda konsantrasyonun uzaklıkla..... değişimi (N yayınan atomlar).....	9
Şekil 2.3	Kararsız difüzyon..... a) Düzgün olmayan konsantrasyon gradyanı... b) Yarı sonsuz katıda konsantrasyon..... gradyanının zamanla değişimi.....	12
Şekil 2.4	Yarı sonsuz metal parçalarında..... konsantrasyon dağılımı.....	15
Şekil 2.5	Kalınlığında kesitlerin herbirinden..... yayınan kütlenin konsantrasyonun..... exponansiyel toplamı.....	15
Şekil 2.6	Penetrasyon eğrisi.....	19
Şekil 3.1	a) Difüzyon ortamında sıcaklık-zaman..... ilişkisi. b) Difüzyon ortamında D-t ilişkisi	20
Şekil 3.2	Kirkendall ve Smigelskas difüzyon deneyi..... düzenegi. W iki taraftaki molibden tel..... arasındaki uzaklığı (çubuk kalınlığı)..... belirtmektedir.....	22
Şekil 3.3	Erime noktasına bağlı olarak aktivasyon..... enerjisinin değişimi.....	24
Şekil 3.4	Elementlerin nötr atomlarının bağlı..... büyüklükleri.....	27
Şekil 3.5	Alüminyum içinde elementlerin yayınıma [C]..	27
Şekil 3.6	Alüminyumda bağlı elementlerin yayınma hızı.. [C].....	30
Şekil 4.1	Katılarda atomlar için potansiyel enerji.... kuyusu (E :itme enerjisi ,E :toplam bağ.... enerjisi ,E :çekme enerjisi).....	31
Şekil 4.2	Sıcaklığa bağlı olarak en yakın iki komşu... atom arasındaki uzaklığın değişimi.....	31
Şekil 4.3	Potansiyel enerji kuyusu ile fiziksel..... özellikler arasındaki ilişki.....	33

Şekil 4.4	Alüminyumda en çok katılan alaşım..... elementlerinin sıcaklığın fonksiyonu olarak, denge yayınımları [11].....	34
Şekil 4.5	Katılarda difüzyon.....	34
Şekil 4.6	Katılarda atomik difüzyon oluşum mekanizması 1) Basit yer değişimi ,2) Fing mekanizması , 3) Boşluk mekanizması ,4) Direkt arayer..... mekanizması ,5) Endirekt arayer mekanizması, 6) Crowdlon mekanizması.....	35
Şekil 4.7	Atomların konumunun enerji ile değişimi.....	36
Şekil 4.8	Boşluk mekanizması için iki model..... a) Kristal ağı kesiti ,b) Birim hücre.....	37
Şekil 4.9	Direkt arayer mekanizması ile fcc kristal... yapıda atomik difüzyon (x yayınan atomları , G = F(x) serbest enerji değişimini..... göstermektedir.).....	38
Şekil 5.1	Elektromagnetik spektrum ve kaynağı.....	40
Şekil 6.1	Difüzyonda oksidasyonu önleme düzenegi..... 1) Yayın+yayınan madde ,2) Piston.....	48
Şekil 6.2	Kesikli ark devresi.....	52
Şekil 6.3	Madde analizi için döner elektrodu ark.....	52
Şekil 6.4	Atomik emisyon spektrometresi blok diyagramı	53
Şekil 6.5	Aktivasyon analizi genel diyagramı (M analiz edilen madde ,M ,ürettilen izotop).....	57
Şekil 6.6	Sintilasyon sayacı ve gamma spektrometresi.. 1) NaI(Tl) sintilatör ,2) Fotomultiplikator, 3) Amplifikatör ,4) Puls analizörü ,5) kayıt	58
Şekil 6.7	Bilgisayar kontrollü çok kanallı..... spektrometresi blok diyagramı.....	58
Şekil 6.8	Difüzyon deney düzenekleri..... a) Vida ile sıkıştırmalı..... b) Basing makinası ile sıkıştırmalı.....	60
Şekil 6.9	Metali eritme fırını..... 1) Elektrik ızgarası ,2) Ateş tuğlası ,.... 3) Isı izolasyon maddesi ,4) Metal difüzyon, düzenegi.....	61
Şekil 6.10	Yarı logaritmik grafiklerle analiz..... a) Matematik model denklemin grafiği..... b) Difüzyon denklemin grafiği.....	62
Şekil 6.11	Alüminyum alaşımında çinko yayınımlı.....	66

Şekil 6.12	Alüminyum alaşımında Zn ve Al aşım..... elementlerinin yayınımları.....	66
Şekil 6.13	C=F(x) grafiğinde eğim Çinko için.....	67
Şekil 6.14	C=F(x) grafiğinde eğim Alaşım elementleri için.....	68
Şekil 6.15	Zn-66 gamma spektrumu.....	70
Şekil 6.16	Alüminyum alaşımında Zn difüzyonu C=F(x).... grafigi.....	71
Şekil 6.17	log C=F(x) grafiği Çinko örnek 20.....	72
Şekil 6.18	Bakırın Al alaşımı yüzeyinden içine yayınımları	76
Şekil 6.19	Alüminyum alaşımında elementlerin yüzeye... doğru yayınımları Örnek 50.....	77
Şekil 6.20	Cu difüzyonu log C=F(x) grafiği.....	78
Şekil 6.21	Alüminyum alaşımında alaşım elementlerinin... yayınımlarının log C=F(x) grafiği... ..	78
Şekil 6.22	Gümüşün Al alaşımı yüzeyinden içine yayınımları	81
Şekil 6.23	Ag-Al alaşımı difüzyon çiftinde ,alaşım.... elementlerinin yüzeye doğru yayınımları.....	81
Şekil 6.24	Gümüş difüzyonu log C=F(x) grafiği.....	82
Şekil 6.25	Örnek 6 alaşım elementlerinin difüzyonu..... log C F(x) grafiği.....	82
Şekil 6.26	Örnek 7 C=F(x) grafiği.....	85
Şekil 6.27	Örnek 7 C=F(x) grafiği.....	85
Şekil 6.28	Ag-110 gamma spektrumu.....	86
Şekil 6.29	Mg difüzyonu C=F(x) grafiği.....	88
Şekil 6.30	Örnek 8 Al alaşımı elementlerinin difüzyonu..	89
Şekil 6.31	Örnek 8 Mg yayınımları log C=F(x) grafiği.....	89
Şekil 6.32	Örnek 8 alaşım elementlerinin yayınımları..... log C=F(x) grafiği.....	89
Şekil 6.33	Örnek 9 Co-60 gamma spektrumu.....	92
Şekil 6.34	Örnek 9 Co-60 C=F(x) grafiği.....	93
Şekil 6.35	Örnek 9 Co-60 log C=F(x) grafiği.....	94

KAYNAKLAR

- [1] M.D. Mikhailov, *Mathematical Methods for Analyzing and Solutions of Heat and Mass Diffusion Problems*, Wiley-Interscience Publication 1967
- [2] O. Grigull and H. Traut, *Thermische Leitung in ausgetheiltem Landmassen*, *Mathematische Physik*, J. Heat Mass Transfer 18, 699-678 (1967)
- [3] J.W. Mitchell, *An Expression for Internal Flow Heat Transfer for Polynomial Wall Temperature Distribution*, *J. Heat Transfer* 91, 175-177 (1969)
- [4] J. Crank, *Mathematics of Diffusion*, Oxford University Press, Fair Lawn N.J. 1956
- [5] O.D. Kellog, *Foundations of Potential Theory*, Dover Publications, New York, 1955
- [6] L. Darken, R. Gurby, *Physical Chemistry of Metals*, Mc Graw-Hill Book Company Inc. 1953
- [7] P. Shewmon, *Diffusion in Solids*, Mc Graw Hill Book Company 1953
- [8] Kittel, *Solid State Physics*
- [9] J. Askill *Tracer Diffusion Data for Metals*, Alloys and Simple Oxide 1970
- [10] Y. Adda et J. Philibert *La Diffusion Les Solides*, Institut National Des Sciences et Techniques Nucleaires, Saclay Tome I-II 1966
- [11] Charli R. Brooks, *Principles of Heat Treatment of Nonferrous Alloys*, University of Tennessee
- [12] C. Barret, W. Nix, *The Principles of Engineering Materials*, Prentice-Hall Inc. New Jersey 1973
- [13] Maurice Pinta, *Modern Methods for Trace Element Analysis*, Ann Arbor Science Publisher Inc. 1976
- [14] H. Willard, L. Morris, *Instrumental Methods of Analysis*, D. Van Nostrand Company 1961
- [15] W.B. Alexander and L. Slifkin, *Diffusion of Solutes in Aluminum and Dilute Aluminum Alloys*, *Physical Review B*, Vol. 1, No. 3, 3274-3282 April 1970
- [16] Shao-Ning Mei and H. Huntington, *Diffusion and Electromigration in Lead Alloys*, *J. Appl. Phys.* 62(2) 444-450 July 1967

- [17] T.S. Landy and J.F. Hardock Diffusion of Al and Mn in Aluminum Journal of Applied Physics Volume 33 No 5 ,1671-1673 ,May 1962
- [18] H. Peterson and S. Rothman Impurity Diffusion in Aluminum Physical Review B. Vol 1. N.3. 3264-3273 April 1970
- [19] J.M. Papazian and R.L. Schulte Lithium Diffusion in Aluminum-Lithium Alloy Metallurgical Transactions Vol. 21A 33-43 JAN. 1990
- [20] A. Rusanov ,Carbon Diffusion in Aluminum and its Alloys ;this Atomindex Vol. 20 No 7 April 1969
- [21] R. Green Real-Time X-Ray Diffraction Investigation of Metal Deformation ,Metallurgical Transactions Vol. 20A No. 4. 595-604 April 1989
- [22] W. Price ,Nuclear Radiation Detection Mc Graw Hill Book Company 1964
- [23] I. Swaid ,N. Guillemot a Two Dimensional Analytical Solution of the Diffusion Equation for Silicon-on Insulator Structures J. Appl. Phys. 65 (11) 5633 15 June 1988
- [24] G. Rabaschewski ,B. Hopkins "Oxidation of Metals and Alloys " Academic Press Inc. New York 1953
- [25] G. Voort ,Metallography Principles and Practices ,Mc Graw Hill Book Company 1970
- [26] E. Kreyszig Advanced Engineering Mathematics ,John Wiley, Sons Inc. 1978
- [27] J.E. Hilliard ,E. Averbach and H. Cohen Acta Met. 7:66 1959
- [28] T. Reumann and H. Böhm J. Phys. Chem. Solids 20,257 1963
- [29] S. Badrinarayanan and H. Mathers Int. J. Apply. Radiat. Isotopes 19(4):353 1968
- [30] J. A. Dean Lange's Handbook of Chemistry 12 th ed Mc Graw-Hill 1979
- [31] H. S. Anand S. Murarka J. Appl. Phys. 1965 36:3660
- [32] W. C. Mallard ,A. B. Gardner Phys. Rev. 1963 129:617
- [33] N. L. Peterson-Phys. Rev. 1965 ,132(2),2471
- [34] D. Dahl ,K. I. Hirano Acta Met. 1965 11(1),1
- [35] A. Berkowitz ,F. Jeannot Phys. Rev. 95:1183 1954