

ENERJİ ÇÖZÜNÜRLÜĞÜNDE
SERBEST BÖLGENİN İNCELENMESİ

Hüsrev ULUĞ

Yüksek Lisans Tezi

Fizik Anabilim Dalı

Temmuz - 2008

ENERJİ ÇÖZÜNÜRLÜĞÜNDE
SERBEST BÖLGENİN İNCELENMESİ

Hüsrev ULUĞ

Dumlupınar Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Lisansüstü Yönetmeliği Uyarınca
Fizik Anabilim Dalında
YÜKSEK LİSANS TEZİ
Olarak Hazırlanmıştır.

Danışman : Doç. Dr. Şükrü ŞENTÜRK

Temmuz - 2008

KABUL VE ONAY SAYFASI

Hüsrev ULUĞ'un YÜKSEK LİSANS tezi olarak hazırladığı “ Enerji Çözünürlüğünde Serbest Bölgenin İncelenmesi” başlıklı bu çalışma, jürimizce lisans yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek kabul edilmiştir.

/ /

Üye : Doç. Dr. Osman ÖZSOY

Üye : Doç. Dr. Zeki KARTAL

Üye : Doç. Dr. Şükrü ŞENTÜRK

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun / / gün ve sayılı kararı ile onaylanmıştır.

Prof. Dr. M. Sabri ÖZYURT
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ENERJİ ÇÖZÜNÜRLÜĞÜNDE SERBEST BÖLGENİN İNCELENMESİ

Hüsrev ULUĞ

Fizik Bölümü, Yüksek Lisans Tezi, 2008
Tez Danışmanı: Doç. Dr. Şükrü ŞENTÜRK

ÖZET

Bu çalışmada serbest bölgenin enerji çözünürlüğüne olan katkısı ele alınmıştır. Hesaplamalar, serbest bölgenin enerji çözünürlüğünün azaldığını göstermektedir. Bunun yanında C bölgesinin artması ile de enerji çözünürlüğü azalmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Enerji çözünürlüğü ve Serbest bölge

INVESTIGATION OF ENERGY RESOLUTION FOR THE FREE REGION

Hüsrev ULUĞ

Physics Department, M.S.c Thesis, 2008

Supervisor: Dr. Şükrü ŞENTÜRK

SUMMARY

In this study, energy resolution was considered for the free region. The calculation indicates that the free region decreases the energy resolution. The resolution was also decreased in the extantion of the region C.

Key words: Energy resolution and free region

TEŐEKKÜR

Yüksek lisans tez çalışmam süresince, yardımlarını, destek ve önerilerini değerli bilgileri doğrultusunda benden esirgemeyen çok değerli hocam Sayın Doç. Dr. Şükrü ŞENTÜRK`e Őükranlarımı sunarım.

Ayrıca çalışmalarım süresince benden maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen aileme teşekkürü bir borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET.....	iv
SUMMARY	v
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	ix
ÇİZELGELER DİZİNİ	x
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xi
1. GİRİŞ	1
1.1.Enerji Düzeylerinin Spektroskopik İncelenmesi.....	4
1.2.Spektroskopi Cihazları	6
1.3. Spektroskopi Çeşitleri.....	6
2. KÜTLE SPEKTROSKOPİSİ.....	8
2.1 Atomik Kütle Spektrometre.....	10
2.1.1. Atomik Kütle Spektrometre Tipleri.....	11
2.2. Kütle Spektroskopisi'nin Tarihiçesi ve Kullanım yerleri.....	12
2.3. Kütle Spektroskopisi Teknikleri.....	13
3. UÇUŞ ZAMANLI KÜTLE SPEKTROMETRESİ (TOF – MS).....	14
3.1 Çalışma Prensibi	14
3.2 Uçuş Zamanının Formülleştirilmesi.....	15
3.3 Enerji Çözünürlüğü.....	17
4. HESAPLAMALAR VE SONUÇLAR	19
4.1. b Değerlerinin Sonuçları.....	19
4.2 Grafikler ve Sonuçlarının Fiziksel Anlamı.....	22

İÇİNDEKİLER (devam)

	<u>Sayfa</u>
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	24
KAYNAKLAR DİZİNİ.....	25

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
1.1. Elektromanyetik spektrumun elektrik ve manyetik bileşenleri.....	2
1.2. Çembersel kutuplanmış elektromanyetik dalga	2
1.3. Elektromanyetik Spektrum.	3
1.4. Elektromanyetik spektrumda bölgeler	7
2.1. Bir kütle spektrometrenin bileşenleri	9
2.2. Bir numunenin kütle spektrumu.....	10
3.1. Spektrometrenin diyagramı	14
4.1. Kütle çözünürlüğünün n ile değişimi	20
4.2. Kütle çözünürlüğünün n ile değişimi	22
4.3. Kütle çözünürlüğünün n ile değişimi	23

ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>Çizelge</u>	<u>Sayfa</u>
1.1. Elektromanyetik spektrum bölgeleri.....	5
2.1. Atomik kütle spektrometre tiplerinden bazıları.....	11

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
E	Elektrik alan
n	Atom sayısı
S	İndirgenmiş hız bileşeni
h	Planck sabiti
b	Ara bölgenin indirgenmiş uzunluğu
v	Parçacığın frekansı
v	Parçacığın hızı
λ	Dalga boyu
T	Uçuş zamanı
L	Serbest uçuş bölgesi uzunluğu
m	Parçacığın kütlesi
q	Parçacığın yükü
x	Başlangıç uzaklığı
X	İndirgenmiş başlangıç pozisyonu
δT_v	Dönme zamanı
V	Potansiyel

<u>Kısaltmalar</u>	<u>Açıklama</u>
IR	İnfrared
R	Raman
NMR	Nükleer manyetik rezonans
TOF-MS	Uçuş zamanlı kütle spektrometresi
CI	Kimyasal iyonlaştırma

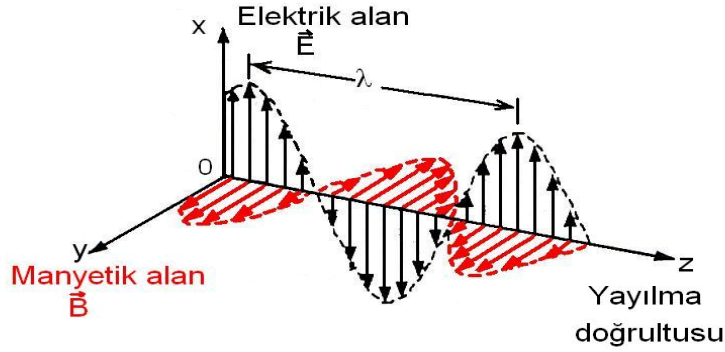
1. GİRİŞ

Spektroskopi; elektromanyetik dalga (enerji) ile maddenin etkileşmesini inceleyen bir bilim dalıdır. Söz konusu madde; çekirdek, atom veya molekül olabilir. Spektroskopik yöntem ile maddenin yapısını, fiziksel ve kimyasal özelliklerini incelemek ve nitel ya da nicel analizler yapmak mümkündür.

Spektroskopi, maddenin soğurduğu veya yaydığı fotonlar incelenerek maddenin iç yapısı hakkında bilgi edinmemizi sağlayan, elektromanyetik ışımının madde ile etkileşmesini konu alan bilim dalıdır. Spektroskopinin çalışma alanları; atomlar, moleküller veya iyonlar tarafından soğurulan, salınan veya önü kesilen ışınımın ve ilgili kimyasal türlerin enerji düzeylerindeki değişmelerin gözlenmesidir. Işınımın, madde (atomlar, moleküller veya iyonlar) tarafından soğurulması veya yayılması olayları incelendiğinde "soğurma" ve "yayınlama" spektroskopileri olarak adlandırılır.

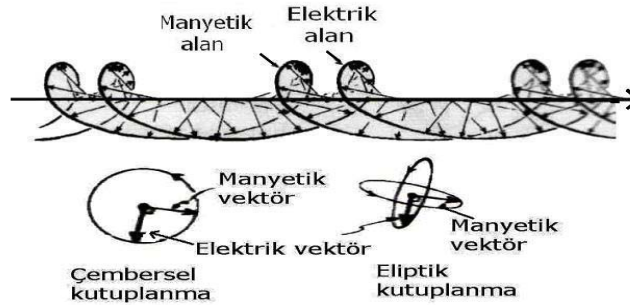
Spektroskopi, bir örnekteki atom, molekül veya iyonların, bir enerji düzeyinden diğerine geçişleri sırasında absorplanan veya yayılan elektromanyetik ışımının ölçülmesi ve yorumlanmasıdır. Elektromanyetik ışım, hem dalga hem tanecik özelliğine sahiptir. İnterferans (girişim) ve difraksiyon (kırınım) davranışları dalga özelliğiyle açıklanır. Bir metal yüzeyinden ışım ile elektronların koparılması (fotoelektrik olay), ışım enerjisinin bir madde tarafından absorpsiyonu (soğurulması) ve emisyonu (yayılması) olayları ışımın tanecik özelliği (foton) ile açıklanır.

Elektromanyetik dalgaların hepsi boş uzayda aynı hızla ($c = 2,998 \times 10^8$ m/s) yayılan ve yayılma doğrultusuna ve birbirine dik elektrik ve manyetik bileşenlerden meydana gelmektedir. Bu durum Şekil 1.1'de gösterilmiştir. Maddenin bir elektromanyetik ışın ile etkileşmesi durumunda elektromanyetik ışınımın elektrik alan bileşeni maddenin atom ve moleküllerinin elektrik, manyetik alan bileşeni ise manyetik özelliklerine etki ederek moleküllerin iç enerjisinde değişmeler meydana getirir. Spektroskopik çalışmalarda, bir elektromanyetik dalganın en çok elektrik bileşeni önemlidir.



Şekil 1.1. Elektromanyetik spektrumun elektrik ve manyetik bileşenleri [1].

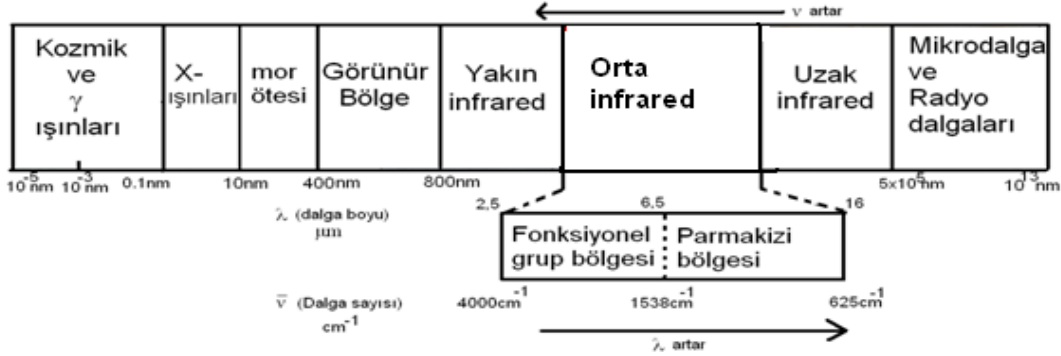
Elektrik ve manyetik alanların boş uzayda birbirlerini indüklemeleri Maxwell Denklemleri'nin bir öngörüsüdür. Salınım yapan bir manyetik alan, salınım yapan bir elektrik alan meydana getirir. Bu salınım yapan elektrik alan, tekrar, salınım yapan bir manyetik alan oluşturur. Bu olgu periyodik olarak devam eder. Şekil 1.2'den de anlaşılacağı gibi buradaki dalgalar da elektromanyetik dalgalardır [2].



Şekil 1.2. Çembersel kutuplanmış elektromanyetik dalga [2].

Elektromanyetik ışınım dalga ve parçacık olmak üzere iki karaktere sahiptir. Klasik teori elektromanyetik ışınımı sürekli bir dalga olarak tanımlarken kuantum mekaniksel teori ise kesikli enerjilere sahip parçacıklar olarak tanımlayarak elektromanyetik ışınımın soğurulmasını ve yayınımını açıklar. Bir madde, üzerine düşürülen çeşitli dalga boylarındaki ışınımlardan sadece bazılarını soğurur. Madde ışınım enerjisini soğurduğunda atom veya molekül uyarılır. Uyarılmış atom veya moleküller daha sonra soğurduğu ışınım enerjisini geri vererek temel haline döner. Madde tarafından soğurulan ışınım enerjisinin geri verilmesi genelde ısı yayması

şeklinde olurken bazı durumlarda da ışınım (foton) yayması şeklinde olur. Elektromanyetik ışınım türleri dalga boylarına ya da frekanslarına göre sınıflandırılarak kozmik ışınlardan radyo dalgalarına kadar çok geniş bir aralığı kapsayan elektromanyetik spektrum oluşturur.



Şekil 1.3. Elektromanyetik Spektrum [3, 4].

Spektroskopi şu temele dayanır: Eğer bir foton, bir atom veya molekül tarafından yayılır ya da soğurulursa enerji düzeyleri arasında bir geçiş meydana gelir. Geçişin olduğu düzeyler arasındaki enerji farkı yayılan ya da soğurulan fotonun enerjisine eşittir. Buna Bohr frekansı denir [8].

$$E_{em} = h\nu = \frac{hc}{\lambda} = E_{üst} - E_{alt} \quad (1.1)$$

İşıma frekansı ışık hızının dalga boyuna oranıdır ki, bu $\nu = c/\lambda$ veya $c = \nu\lambda$ şeklindedir.

Elektromanyetik ışınım türleri dalga boylarına veya frekanslarına göre sınıflandırılarak geniş bir aralıkta elektromanyetik spektrum elde edilir. Işımayı oluşturan ve ışık hızıyla hareket eden parçacıklara foton denir. Işımanın parçacık özelliği, moleküllerin ışınımı soğurmalarının açıklanmasında çok yararlıdır. Bu ışınım belirli enerji büyüklüklerinden oluştuğundan ışınım enerjisi kuantumlanmıştır. Yani, ışınım enerjisi hem dalga hem foton akımlarıdır. Işıma enerjisi sürekli olmayıp kesikli biçimde kuantumlanmış olarak soğurulup yayınlanabilir [6].

Spektroskopi yöntemi, atom veya molekül yapısının aydınlatılmasında en çok yararlanılan yöntemdir. Maddenin enerji seviye aralıkları dolayısıyla molekül yapısı hakkında bilgi edinmemizi sağlar.

1.1. Enerji Düzeylerinin Spektroskopik İncelenmesi

Elektromanyetik ışığa, atom veya moleküle etki edince, enerji değişimine neden olur. Işıma soğurulduğunda molekülün enerji düzeyi yükselir, yayınlanırsa enerji düzeyi azalır [7].

Her atom veya molekülün elektromanyetik ışınım ile kendine has bir etkileşimi vardır. Bu etkileşme molekülün enerji düzeyleri arasında geçişlere neden olur. Bohr teorisine göre soğurulacak ışınım enerjisi :

$$E_{em} = h\nu = \frac{hc}{\lambda} = E_{üst} - E_{alt} \quad (1.2)$$

olacağından bu geçişe sadece ν frekansıyla ışığa türü sağlayacaktır. Molekül ν frekanslı ışığı soğuracak fakat frekansı bu değerden yüksek veya düşük olan ışığa türlerini soğurmaz. Değiştirilen frekansa veya dalga boyuna karşı soğurma şiddeti kaydedilir ve bir soğurma spektrumu elde edilir. Soğurmanın olduğu frekanslarda bir soğurma piki veya bandı gözlenmektedir. Burada ΔE , iki seviye arasındaki enerji farkı ($E_{üst} > E_{alt}$ veya $E'' > E'$), h , Planck sabiti ve ν , elektromanyetik ışınımın frekansıdır. E'' seviyesinden E' seviyesine geçmesi molekülde ışınım yayar, tersi bir durumda ışınım soğurur.

$$\Delta E = E'' - E' = h\nu \quad (1.3)$$

Seviyeler arasındaki geçişler, gelen elektromanyetik dalganın enerjisine bağlı olarak değişik spektrum bölgelerine ayrılır. Elektromanyetik ışınımaya dayanan spektroskopik yöntemler spektroskopik tip ve buna ait dalga boyuyla dalga sayısının yaklaşık değerleri kuantum geçiş tipi ile birlikte Çizelge 1.1'de verilmektedir.

Çizelge 1.1. Elektromanyetik spektrum bölgeleri [5].

Spektroskopi Tipi	Dalga boyu (nm)	Dalga sayısı Aralığı (cm ⁻¹)	Kuantum Geçiş Tipi
γ- ışını yayınımlı	0,001 -0,1	3.10 ⁸ - 3.10 ¹⁰	Nükleer
X - ışını soğurması, yayınımlı ve kırınımlı	0,1 - 10	3.10 ⁶ - 3.10 ⁸	İç elektronlar
Ultraviyole(UV) - Görünür soğurması ve yayınımlı	10 – 400 400 – 780	10000 – 30000	Dış elektronlar
İnfrared (IR) soğurması ve Raman (R) saçılması	780 – 3.10 ⁵	300 –10000	Moleküler dönme/titreşim
Mikrodalga soğurması	3.10 ⁵ -3.10 ⁶	0,3 – 300	Moleküler dönme
Elektron spin rezonansı (ESR)	3.10 ⁷	0,03 - 0,3	Manyetik alandaki elektronların spini
Nükleer magnetik rezonans (NMR)	6.10 ⁸ – 10 ¹⁰	0,017 – 1000	Manyetik alandaki çekirdeklerin spini
Radyo dalgaları	10 ¹⁰ - 10 ¹³	3.10 ⁻⁴ - 0,03	Elektron veya çekirdeğin spini

X - ışınları bölgesi: Bir atom veya moleküldeki iç kabuk elektronlarının geçişlerinin incelendiği bölgedir. Görünür ve Mor ötesi (UV) bölgesi: Bir atom veya molekülün dış kabuğundaki geçişlerin incelendiği bölgedir. Kısa dalga boylu morötesi ışınlar zararlı olabilirler. Yüksek enerjilidir. İnfrared soğurma ve Raman saçılma bölgeleri: Bir moleküldeki titreşim ve dönme enerji seviyeleri arasındaki geçişler İnfrared ve Raman bölgesinde incelenir. Yani, molekülün titreşim frekansları bu bölgede spektrum verir. Titreşim enerji seviyeleri arasındaki geçişlerinin incelendiği bölgedir. Mikrodalga bölgesi: Molekülün dönmesinin incelendiği bölgedir. Dönme enerjilerinin arasındaki geçişlerin spektrumu bu bölgede meydana gelir. Radyo dalgaları bölgesi: Elektron veya çekirdeğin spininin işaret değiştirmesinden kaynaklanan enerji değişimlerinin spektrumu bu bölgededir.

1.2. Spektroskopi Cihazları

Maddelerin spektroskopik analizi, soğurulan ışımının frekansının ve şiddetinin ölçülmesinden ibarettir. Bu ölçmenin yapıldığı ve spektrumların kaydedilmesi için kullanılan cihazlara spektrometre denir. Spektrometre şu bölümlerden oluşur: 1.Elektromanyetik ışımaya kaynağı 2.ışımaya şiddetinin kontrolü ışımaya demeti elde edilmesi 3.ışımaya dalga boyunun kontrolü tek dalga boyunda (monokromatik) ışın demetinin elde edilmesi 4.örnek hücresi 5.örnekten çıkan ışımının çeşitli dalga boylarında toplanması ve soğurma şiddetinin ölçülmesi 6.çeşitli dalga boylarında soğurmanın şiddetinin kaydedilmesi ve spektrumun elde edilmesidir [6].

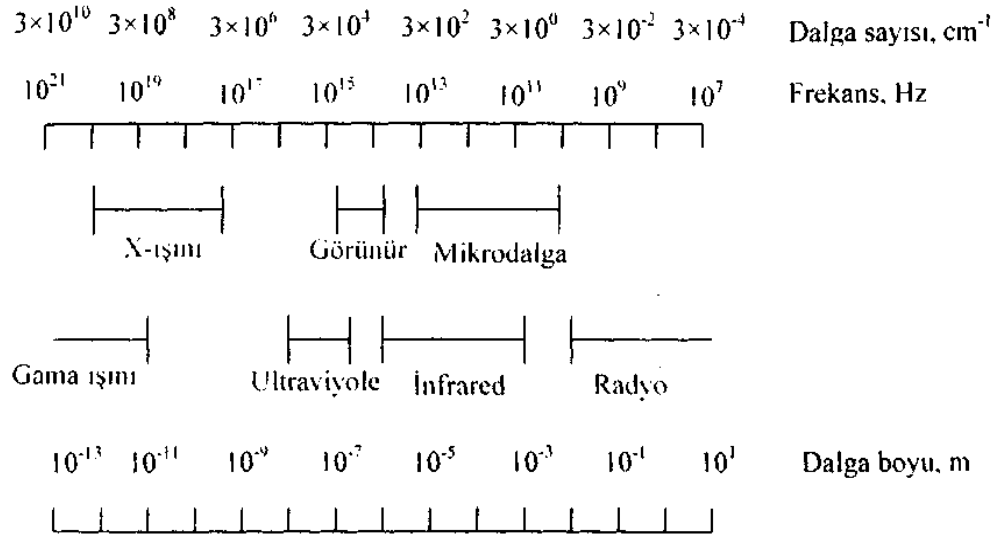
1.3. Spektroskopi Çeşitleri

Atom veya moleküllerin dönme, titreşim ve elektronik enerji düzeylerinde meydana gelen değişikliklerin incelenmesi en önemli spektroskopi türlerini oluşturur. Bunlar;

- a) Ultraviyole ve görünür alan spektroskopisi (Elektronik Spektroskopisi)
- b) İnfrared spektroskopisi (Titreşim Spektroskopisi)
- c) Raman spektroskopisi (Titreşim Spektroskopisi)
- d) Nükleer manyetik rezonans spektroskopisi (NMR Spektroskopisi)
- e) Kütle spektroskopisi (Atomik Kütle Spektroskopisi)
- f) Fotoelektron spektroskopisi
- g) Alev spektroskopisi
- h) Atomik absorpsiyon spektroskopisi
- i) Atomik emisyon spektroskopisi
- j) Floresimetri (floresans) spektroskopisi

Bir madde, üzerine düşürülen çeşitli dalga boylarından (UV ışınlarından radyo dalgalarına kadar) ancak bazılarını soğurur. Maddenin bu özelliğinden yararlanılarak yapısı, konsantrasyonu ve benzeri özellikleri tayin edilebilir. Bunun için madde üzerine, dalga boyu 110 nm'den 3000 nm'ye kadar değişen ışınlar düşürülür. Bütün bu dalga boylarını tespit edecek tek bir cihaz yapmak mümkün olmadığından, belirli dalga boyları arasında çalışan cihazlar geliştirilmiştir. 110 – 1000 nm dalga boylarındaki ışınlar ile çalışan cihazlara UV ve görünür alan, 2500 – 25000 nm dalga boylarında çalışan cihazlara IR ve dalga boyları yüzlerce metre kadar değişen radyo dalgalarıyla çalışan cihazlara da NMR cihazları denir. Bu cihazların geçerli oldukları alan spektroskopilerine de sırasıyla UV ve görünür, IR ve NMR spektroskopileri denir. Kullanılan ışınların dalga boylarından da anlaşılacağı üzere spektroskopiler içinde en çok enerji gerektireni UV iken en az enerji gerektireni de NMR spektroskopisidir.

Elektromanyetik ışınım uzayda çok büyük hızla hareket eden bir enerji şeklidir. Elektromanyetik ışınım türlerini, dalga boylarına ve frekanslarına göre sınıflandırılarak elektromanyetik spektrum elde edilir. Şekil 1.5'te görüldüğü gibi elektromanyetik spektrum çok geniş bir dalga boyu ve frekans içermektedir.



Şekil 1.4. Elektromanyetik spektrumda bölgeler

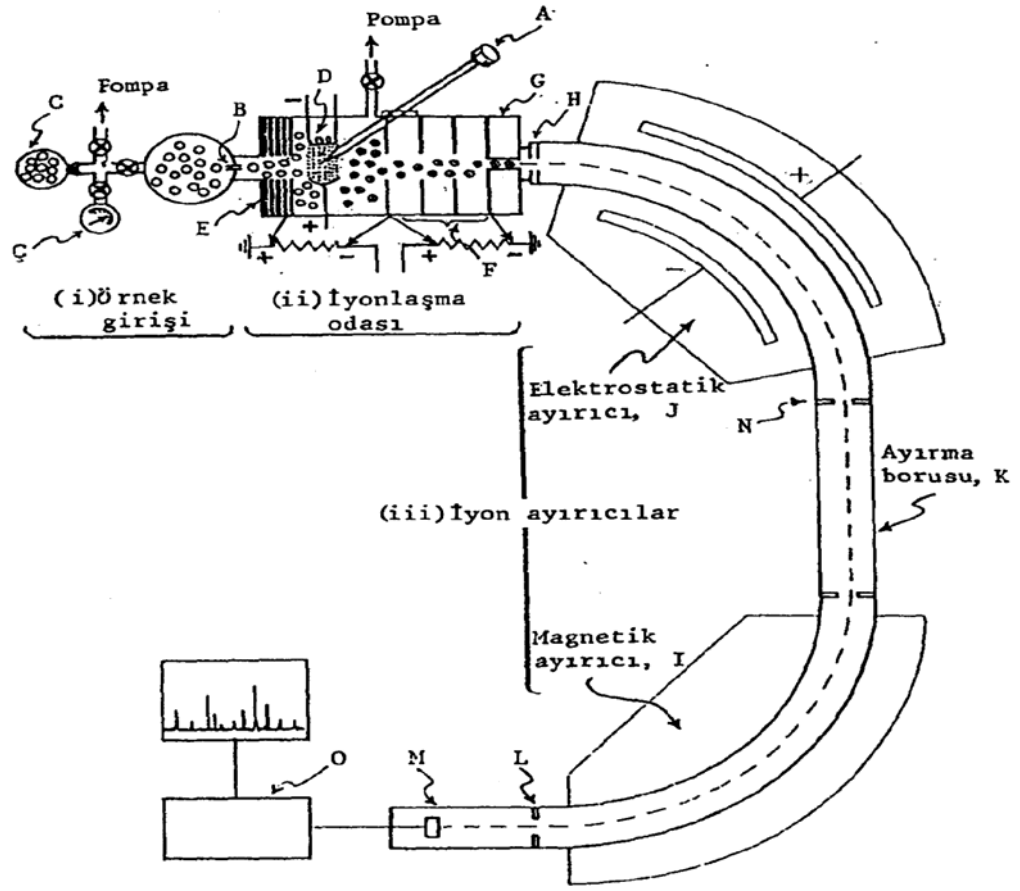
2. KÜTLE SPEKTROSKOPİSİ

Kütle spektroskopisi, katı, sıvı ve gaz halindeki maddelerin özellikle atom veya molekül ağırlıklarının saptanmasında, moleküler yapılarının incelenmesinde kullanılan etkin bir yöntemdir. Başka bir ifadeyle, özel bir düzeneğe kullanılarak pozitif yüklü parçacıklar meydana getirilmesi, bu parçacıkların m/e oranlarına göre ayrılması, belirlenmeleri ve bunlardan yararlanarak numunenin teşhis edilmesi üzerine kurulmuş olan metotlar topluluğuna kütle spektrometresi denir. Pozitif yüklü tanecikler, bir molekül iyonu veya metal iyonu olabildiği gibi molekülün parçalanması ile meydana gelen herhangi bir parçacık da olabilir. Böylece söz konusu numuneye göre ortamda çok sayıda pozitif yüklü tanecik bulunabilir. Bu taneciklerden her biri spektrumda m/e değerlerine göre birer pik verir.

Kütle Spektroskopisinde madde, yüksek enerjili (~ 70 eV veya $6000 \text{ kcal mol}^{-1}$) elektron demeti ile bombardıman edilir ve oluşan pozitif iyonlar kütle / yük oranlarına göre kaydedilir. Kütle spektrumu ile maddenin molekül kütlesi ve molekül formülü elde edilir. İçerdiği fonksiyonlu gruplar ve yapısı da bulunabilir [6].

Kütle spektrometresi yönteminde, atom veya moleküllerden gaz fazında iyonlar oluşturulur ve bu iyonlar kütlelerine göre birbirinden ayrılarak kaydedilir. İyonların bağıl miktarlarının (kütle / yük) oranlarına göre çizilmiş grafiğine kütle spektrumu denir. Bir kütle spektrumu, piklerin m/e değerlerine karşı bağıl bolluklarının düşey çizgiler halinde grafiğe alındığı çubuk grafiği şeklinde gösterilir veya pikleri m/e değerlerine karşı bağıl bollukları hesaplanarak iyon kütlesi-bağıl bolluk çizelgesi düzenlenir. Kütle spektrumunda şiddeti en büyük olan pike temel pik denir. Bunun şiddeti %100 alınarak diğer iyonların bağıl bollukları hesaplanır [6].

Kütle spektrometresi yapısı belli maddeleri belirtmek ve tayin etmek amacıyla kullanılabilirdiği gibi, yapısı belli olmayan yeni maddelerin yapısını aydınlatmak amacıyla da kullanılabilir.



Toplayıcı, dedektör ve kaydedici.

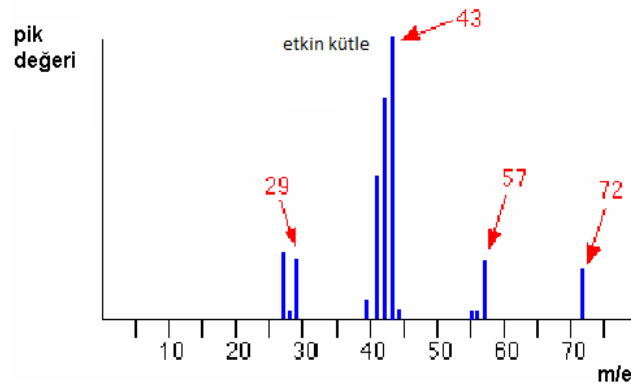
Şekil 2.1. Bir kütle spektrometrenin bileşenleri [6].

Bir maddenin kütle spektrumunun elde edilebilmesi için bunun önce gaz fazına geçirilmesi ve daha sonra iyonlaştırılması gerekir. Örnek, önce kütle spektrometresinin vakum altında tutulan giriş kısmına gönderilir ve madde gaz fazında değilse, ısıtılarak gaz fazına geçmesi sağlanır. Gaz haline getirilmiş maddenin molekülleri ince bir delikten difüzyon ile iyonlaşma bölgesine sızarlar.

Kütle spektrometresinde iyonlaştırma bölgesinde elde edilen iyonlar, elektrikle yüklü plakalara doğru çekilerek hızlandırılır ve kütle ayırıcısına gönderilir. Kütle ayırıcıları, manyetik, uçuş zamanlı, dört kutuplu ve iyon siklotron rezonanslı olmak üzere dört türdür. En çok kullanılan kütle ayırıcısı, manyetik ayırıcıdır.

Kütle spektrometresinde kütle ayırıcısından geçen iyonlar dedektör tarafından algılanır. Kütle spektrometresinde iyonları algılamak üzere kullanılan dedektörlerin en basiti, Faraday kabıdır. Bu dedektörde bir iletken kap, spektrometrenin öteki kısımlarına göre negatif bir potansiyelde tutulur ve böylece bu kaba doğru çekilen pozitif yüklü iyonlar elektrik akımı oluştururlar. Kütle spektrometresinde hem pozitif hem de negatif iyonlar incelenebilir, ancak pozitif iyonların incelenmesi daha yaygın bir uygulamadır. Kütle spektrometresinde, belli koşullarda elde edilen ve parçalanma ürünlerini içeren kütle spektrumu aynı koşullarda elde edilmiş spektrumlarla karşılaştırılarak molekülün nitel analizi yapılır.

Kütle spektrumunda ölçülen en şiddetli pik, temel pik adını alır ve bu, parçalanma ürünleri içinde en kararlı iyonadır. Öteki piklerin bağıl şiddetleri bu pike göre hesaplanır.



Şekil 2.2. Bir numunenin kütle spektrumu.

Kütle spektrometresi, mevcut spektroskopik yöntemler arasında molekülün tüm yapısı hakkında bilgi veren ve çoğu zaman molekül kütle ve formülünün bulunmasını sağlayan tek yöntemdir [6].

2.1. Atomik Kütle Spektrometre

Bir atomun elektron enerji düzeyinin değişmesine atomik spektroskopi denir [7]. Yani, atomik spektroskopi elektronik enerji düzeylerini içerir. Atomik kütle spektrometre, madde

içindeki elementlerin ne olduklarını saptamakta ve derişimlerini tayin etmekte yaygın olarak kullanılan bir araçtır. Periyodik çizelgede yer alan elementlerin hemen hemen hepsi kütle spektrometre ile tayin edilebilir.

Atomik kütle spektrometrenin, atomik optik spektrometrik yöntemlere göre, gözlenebilme sınırları, birçok element için üç merteye daha iyidir. Tayin edilen elemente özgü, önemli ölçüde basit spektrumlar elde edilir. Bunların yorumları da kolayca yapılabilir. Atomların izotop oranları ölçülebilir. Ancak cihaz, optik atomik cihazlara göre çok daha pahalıdır. Cihazdaki kayma saatte %5'ten %10'a kadar yüksek değerlerde olabilir.

Çalışma ilkesi: Bir atomik kütle spektrometrik analiz aşağıdaki basamakları kapsar: (1) atomlaşma. (2) Basamak 1' de oluşan atomların büyük bir kısmının iyon akımlarına dönüşümü (genellikle tek yüklü pozitif iyonlar) ve (3) Basamak 2' de oluşan iyonların kütle / yük oranlarına (m/e) göre ayrılması (burada m , atomik kütle birimi olarak iyonun kütlesi, e ise yüküdür) ve (4) Her tip iyonun sayılarının sayılması veya uygun bir dedektörle numunenin çarpışmasından oluşan iyonların ürettiği iyon akımının ölçülmesi. Basamak 2' de oluşan iyonların çoğu tek yüklü olduğu için, genellikle m/e , iyonun kütlesine eşittir. Basamak 1 ve 2, atomik optik spektroskopiyile aynı teknikleri kapsar. Basamak 3 ve 4 kütle spektrometri ile gerçekleştirilir.

2.1.1 Atomik Kütle Spektrometre Tipleri

Çizelge 2.1. Atomik kütle spektrometre tiplerinden bazıları

İsim	Kısaltma	Atomik İyon Kaynakları	Tipik Kütle Analizörü
İndüktif eşleşmiş plazma	ICP-MS	Yüksek-sıcaklık argon plazma	Kuadropol
Doğru akım plazma	DCP-MS	Yüksek-sıcaklık argon plazma	Kuadropol
Mikrodalga-uyarımli plazma	MIP-MS	Yüksek-sıcaklık argon plazma	Kuadropol
Kıvılcım kaynağı	SS-MS	Radyo-frekans elektrik kıvılcımı	Çift-odaklamalı
Termal iyonlaşma	TI-MS	Elektriksel olarak ısıtılan plazma	Çift-odaklamalı
Akkor boşalımı	GD-MS	Akkor-boşalımı plazma	Çift-odaklamalı
İkincil iyon	SI-MS	Hızlandırılmış iyon bombardımanı	Çift-odaklamalı
Lazer mikroskobu	LM-MS	Odaklanmış lazer ışını	Uçuş-zamanlı

2.2. Kütle Spektroskopisi'nin Tarihçesi ve Kullanım Yerleri

Kütle spektrometrisi eskiden beri bilinen analiz metotlarından birisidir. İlk defa 1913 yılında Thomson tarafından kullanılmış ve Neon'un iki izotopunun olduğu bulunmuştur. [Ne(20) ve Ne(22)]. Metot 1920'li yıllarda Aston (UK) ve Dempster (USA) tarafından geliştirilmiş ve kaydedicisi olan daha hassas cihazlar yapılmıştır. Bu cihazlar sayesinde izotopların hem kütleleri hem de yüzdeleri gerçeğe çok daha yakın bir şekilde tayin edilmiştir. Ayrıca izotopların kütlelerinin daha iyi tayin edilmeleri sonucu, elementlerin atom kütleleri tabloları da yeniden düzenlenmiştir. Bu çalışmalar sonucunda atom kütlelerinin tam sayılar olmadığı gerçeği de ortaya çıkmıştır.

Kütle spektroskopisi oldukça eski bir analitik yöntemdir. 1918 yıllarında hassas kütle ölçmeleri yapılabiliyordu. O zamandan günümüze kütle spektroskopisi, yeni yöntemlerin bulunması ve bilgisayar uyumunun sağlanması ile çok daha gelişmiştir. Bununla beraber, pahalı olması ve özel kullanma tekniğini bilen operatör gereksinimi nedeniyle diğer yöntemlerden (kırmızı ötesi IR ve NMR spektrometrisi) farklı olarak ancak büyük araştırma grupları tarafından kullanılmaktadır. Kütle spektrometrisinde çok az miktarda madde kullanılarak yapı analizi yapılabildiği gibi, organik yapı analizi için tek başına bilgi verebilen çok yararlı bir yöntemdir [6].

Ticari kütle spektrometreleri, 1942'de piyasaya çıkarılmış ve ilk olarak petrol bileşiklerinin analizlerinde kullanılmıştır. Organik ve biyokimyada kullanımı 1960 'da başlamış ve kısa bir süre içinde birçok maddenin yapısı aydınlatılmıştır. Böylece metodun UV, IR ve NMR' den daha güçlü bir yapı aydınlatma vasıtası olduğu ortaya çıkmıştır. Buradan da, kütle spektroskopisinin diğer spektroskopi dallarından farkı için ise; kütle spektroskopisinde madde ilk halini muhafaza etmiyor, daha küçük kütlelere bölünüyor yorumunu yapabiliriz.

Kütle spektrometresinde gözlenen piklerin yüksekliği örnekte bulunan maddenin derişimi ile doğru orantılı olduğundan bu yöntem, nicel analiz amacıyla da kullanılır. Bu yöntemle nicel analiz, çok az bir miktar örnek ile ve büyük bir duyarlılıkla gerçekleşir. Kütle spektrometresi ile, alkaloidler, terpenler, steroidler, ilaçlar, petrol ürünlerinin nitel ve nicel analizi yapılabilir. Yöntem, adli tıpta ve uyuşturucu madde analizinde sıkça kullanılır. Gaz haline getirilmesi zor olan veya ısıtılınca bozunmaya uğrayan bileşiklerin kütle spektrometrik analizi için uygulanacak bir yöntem; bu bileşikleri belli moleküllerle tepkimeye sokarak uçucu özelliği olan ürünlere çevirmektir.

2.3. Kütle Spektroskopisi Teknikler

Kütle spektrometre, iyonlaşma bölgesinde elde edilen hareketli iyonlar, elektrikle yüklü plakalara doğru çekilerek hızlandırılır. Ve kütle ayırıcısına gönderilir ve kütle ayırıcısında kütle/yük (m/e) oranlarına göre hızlıca ayrılır. İyonların çoğu tek yüklü olduğundan, oran basitçe iyonun kütesine eşittir. Kütle spektrometrelerine, kütle spektroskopisinin teknik incelenmesi olarak bakabiliriz. Çeşitli kütle spektrometreleri kullanılmaktadır. Bunlar:

I- İyonlaştırma Teknikleri: Elektron çarpması (EI), Kimyasal iyonlaştırma (CI), Alan iyonlaşması (FI), Alan desorbsiyonu (FD), Parçacıklar ile veya ışına ile desorbsiyon iyonlaşması [6].

II- İyon Ayrılması Teknikleri: Manyetik alanlı (iyon saptırmalı) kütle spektrometresi, Kuadropol kütle spektrometresi, İyon-siklotron rezonansı kütle spektrometresi (ICR-MS) ve Uçuş zamanlı kütle spektrometresi (TOF-MS)'dir [6].

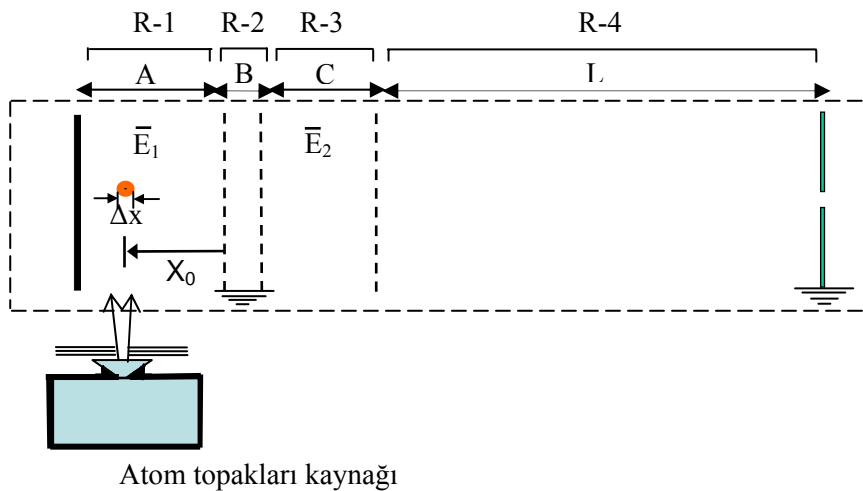
III- Gaz kromatografisi kütle spektroskopisi (GC-MS) ve Sıvı Kromatografi kütle spektroskopisi (HPLC-MS)'dir [6].

3. UÇUŞ ZAMANLI KÜTLE SPEKTROMETRESİ (TOF-MS)

İyonların ayrılması için değişik kütleli iyonların aynı potansiyelle hızlandırıldıkları zaman aynı sürede değişik hızlar kazanmaları özelliğinden yararlanılır. Büyük kütleli iyonların hızı küçük olacağından belli bir uzaklığı uçuş süreleri de uzun olacaktır. Bir gerilim pulsu ile iyon kaynağından çıkarılan iyonlar, bir gerilim farkı ile hızlandırılır ve uçuş tüpüne yollar. Uçuş tüpü 1-2 m uzunluğunda ve manyetik alanın olmadığı bir tüp olup dedektöre bağlıdır. İyonlar, m/e değerlerine göre farklı sürelerde toplanarak kaydedilir. İyonların uçuş süreleri arasındaki farklar 10^{-7} s'den küçük olduğundan piklerin kaydı için, duyarlı ve hızlı kayıt yapabilen elektronik cihazlar kullanılır. Çok yüksek ayırmalı değillerdir. Gaz fazında yürüyen hızlı kimyasal reaksiyonların çalışılmasında yararlıdırlar.

3.1. Çalışma Prensibi

Göz önüne alınan kütle spektrometresi dört bölgeden oluşmaktadır. Birinci bölge (R-1) iyonlaşma bölgesi, ikinci bölge (R-2) ara bölge, üçüncü bölge (R-3) hızlandırma bölgesi, dördüncü bölge (R-4) ise serbest uçuş bölgesidir. Atom topakları kaynağından çıkan nötr parçacıklar spektrometre eksenine dik olarak spektrometreye 1. bölgeden girerler. Parçacıklar iyonlaştırılır ve E_1 elektrik alanı tarafından 2. bölgeye doğru itilir. 2. bölge olan ara bölgede potansiyel gerilim yoktur. Parçacıklar ara bölgeden 3. bölgeye serbest olarak geçer. 3. bölgede parçacıklar E_2 elektrik alanı tarafından hızlandırılır. Parçacıklar serbest uçuş bölgesi olan 4. bölgede serbest olarak sürüklenirler. Kütleleri farklı olan iyonlar bu bölgede ayrılırlar.



Şekil 3.1. Spektrometrenin diyagramı

3.2. Uçuş Zamanının Formülleştirilmesi

Parçacıkların kütlesi m , yükü q , ilk ızgaradan başlangıç uzaklık x , spektrometre eksenini boyunca başlangıç hız bileşeni v ve parçacıkların üç bölgedeki uçuş zamanının toplamı toplam uçuş zamanı $T(x, v)$ alındığında ;

$$T_1(x, v) = \frac{m}{qE_1} \left(\sqrt{v^2 + \frac{2q}{m} V_a \frac{x}{A}} - v \right) \quad (3.1)$$

$$T_2(x, v) = \frac{m}{qE_2} \left(\sqrt{v^2 + \frac{2q}{m} \left(V_a \frac{x}{A} + V \right)} - \sqrt{v^2 + \frac{2q}{m} V_a \frac{x}{A}} \right) \quad (3.2)$$

$$T_3(x, v) = \frac{L}{\sqrt{v^2 + \frac{2q}{m} \left(V_a \frac{x}{A} + V \right)}} \quad (3.3)$$

İndirgenmiş parametre yaklaşımı kullanıldığında ifadeler aşağıdaki gibi basitleştirilebilir:
 $X = x/L$ parçacığın indirgenmiş başlangıç pozisyonu ,

$$S = v \sqrt{\frac{m}{2qV}} \quad (3.4)$$

Spektrometre eksenini boyunca indirgenmiş hız bileşeni, $b = B/L$ 2. bölge olan ara bölgenin indirgenmiş uzunluğu, $c = C/L$ 3. bölgenin indirgenmiş uzunluğudur. Diğer taraftan

$$E = (V_a/V)(L/A) \quad (3.5)$$

ifadesi 1.bölgedeki indirgenmiş elektrik alanıdır. Böylece, bölgesel uçuş zamanlarını yeniden,

$$T_1(x, v) = L \sqrt{\frac{m}{2qV}} \frac{2(\sqrt{S^2 + EX} - S)}{E} \quad (3.6)$$

$$T_2(x, v) = L \sqrt{\frac{m}{2qV}} 2c(\sqrt{S^2 + EX + 1} - \sqrt{S^2 + EX}) \quad (3.7)$$

$$T_3(x, v) = L \sqrt{\frac{m}{2qV}} \frac{1}{\sqrt{S^2 + EX + 1}} \quad (3.8)$$

şeklinde düzenleyebiliriz. Bu durumda parçacığın toplam uçuş zamanı:

$$T(x, v) = L \sqrt{\frac{m}{2qV}} f(X, S) \quad (3.9)$$

$$f(X, S) = \frac{2(\sqrt{S^2 + EX} - S)}{E} + \frac{2b}{\sqrt{S^2 + EX + 1}} + 2c(\sqrt{S^2 + EX + 1} - \sqrt{S^2 + EX}) + \frac{1}{\sqrt{S^2 + EX + 1}} \quad (3.10)$$

şeklindedir. Kaynak spektroskopisi eksenine dik ise $S = 0$ olur. Yani,

$$f(X, 0) = \frac{2(\sqrt{EX})}{E} + \frac{2b}{\sqrt{EX + 1}} + 2c(\sqrt{EX + 1} - \sqrt{EX}) + \frac{1}{\sqrt{EX + 1}} \quad (3.11)$$

ifadesi, E ve c indirgenmiş parametrelerine bağlı $S = 0$ durumundaki $f(X, S)$ fonksiyonudur.

3.3 Enerji Çözünürlüğü

Uçuş zamanlı kütle spektroskopisinin enerji çözünürlüğü, iyonların başlangıç hızlarının dağılımını telafi etme yeteneğidir. Aşağıda standart uygulama izlenecek ve enerji çözünürlüğü olarak belirtilecektir.

İki özdeş (aynı kütle ve aynı yüke sahip) aynı başlangıç pozisyonunda, aynı başlangıç kinetik enerjili, fakat zıt yönlü iyon olarak ele alalım. Bu iyonlardan uçuş tüpü doğrultusunda giden iyonun hızı v , zıt yöndeki iyonun hızı ise $-v$ olsun. $-v$ hızlı iyon, v hızlı iyon ile kıyaslandığında etrafında dönme zamanı δT_v zamanına ihtiyaç duyacaktır. v hızlı iyon için etrafında dönme hızı:

$$\delta T_v = T(x, -v) - T(x, v) \quad (3.12)$$

olacaktır. $-v$ hızlı iyon için

$$\delta T_v = T(x, -v) - T(x, v) \quad (3.13)$$

olur. Denklem 3.9 kullanılarak

$$\delta T_v = L \sqrt{\frac{m}{2qV} \frac{4S}{E}} = \frac{2mv}{qE_1} \quad (3.14)$$

ifadesi elde edildi. Burada S azaltılmış hız parametresi, E_1 1. Bölgedeki elektrik alanıdır. Buradan, atom topağının başlangıç hızına bağlı olarak kütle enerji çözünürlüğü,

$$\left(\frac{m}{\delta m}\right)_v = \frac{T}{2\delta T_v} \quad (3.15)$$

şeklindedir. Hız dağılımı ne kadar büyük olursa δT_v doğru orantılı olarak artacaktır. Böylece kütle çözünürlüğü azalacaktır.

Numune kaynağı, spektrometre eksenine dik olmalıdır. Çünkü v 'yi minimize etmek istiyoruz. Bundan dolayı δT_v de küçülmüş olur. Dolanma zamanı göz önüne alınmış olduğunda v 'nin değeri v_0 hızının eksen boyunca bileşenidir. Bu durum iyonlaşma hacminin kenarlarındaki atom topaklarına karşılık gelir.

Atom topaklarının kaynaktan çıkış hızı v_0 olup,

$$v = v_0 \sin \left[\tan^{-1} \left(\frac{\Delta x/2}{d_s} \right) \right] = v_0 \left(\frac{\Delta x/2}{d_s} \right) \quad (3.16)$$

v hızı bu ifadeyle yazılabilir.

4. HESAPLAMALAR VE SONUÇLAR

Bu bölümde uçuş zamanlı spektrometrenin enerji çözünürlüğü, kaynak spektrometre eksenine dik alınarak incelendi. Bu incelemede enerji çözünürlüğü metodu kullanıldı. Ara bölgenin (R-2) enerji çözünürlüğüne etkisinin ölçüsünün bulunması için hesaplamalar farklı b değerleri için yapıldı. $L = 1,5$ m ve ara bölgesi (R-2) olan b'nin farklı değerleri alındı. ($b = 0$, $b = 0,004$, $b = 0,008$, $b = 0,012$) Bu hesaplamalarda potasyum (K_n^+) kullanıldı.

Ara bölgenin enerji çözünürlüğüne olan katkısını hesaplamak için b'nin farklı değerlerine karşılık gelen toplam uçuş zamanı $T(x, v)$, dolanma zamanı δT_v ve böylece kütle enerji çözünürlüğü $(m/\delta m)_v = T/(2\delta T_v)$ hesaplandı. Bu hesaplamalarda c'nin katkısı da göz önünde bulunduruldu. Burada iki farklı c değeri olan $c = 0,01$ ve $c = 0,03$ için b'nin değerleri yazılıp sonuçlar elde edildi.

4.1. b Değerlerinin Sonuçları

$L = 1,5$ m ve $c = 0,01$ (yani $C=c.L=1,5$ cm) için kullanılan b değerlerinin sonuçları:

$$b=0 \quad T(x, v) = 10,541.10^{-6} \sqrt{n}$$

$$\delta T_v = 3,336703.10^{-10} \text{ n}$$

$$\frac{T}{2\delta T_v} = 15795/\sqrt{n}$$

$$b=0,004 \quad T(x, v) = 10,652.10^{-6} \sqrt{n}$$

$$\delta T_v = 3,410807.10^{-10} \text{ n}$$

$$\frac{T}{2\delta T_v} = 15615,06/\sqrt{n}$$

$$b=0,008 \quad T(x, v) = 10,765.10^{-6} \sqrt{n}$$

$$\delta T_v = 3,489206.10^{-10} \text{ n}$$

$$\frac{T}{2\delta T_v} = 15426,28/\sqrt{n}$$

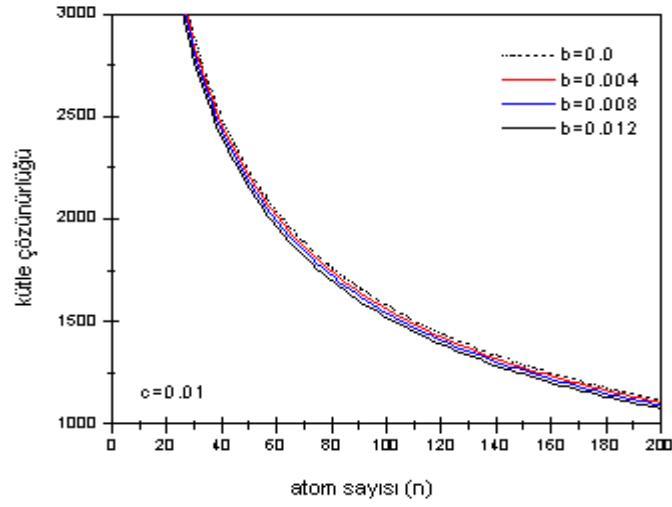
$$b=0,012 \quad T(x, v) = 10,882.10^{-6} \sqrt{n}$$

$$\delta T_v = 3,576840.10^{-10} n$$

$$\frac{T}{2\delta T_v} = 15211,74/\sqrt{n}$$

olarak elde edildi.

$L = 1,5$ m ve $c = 0,01$ için kütle çözünürlüğünün n (atom sayısı) ile değişimi şekil 4.1`de verilmektedir.



Şekil 4.1. Kütle çözünürlüğünün n ile değişimi.

$L = 1,5$ m ve $c = 0,03$ (yani $C=c.L = 4,5$ cm) için kullanılan b değerlerinin sonuçları:

$$b=0 \quad T(x, v) = 10,8593.10^{-6} \sqrt{n}$$

$$\delta T_v = 3,4861.10^{-10} n$$

$$\frac{T}{2\delta T_v} = 15575/\sqrt{n}$$

$$b=0,004 \quad T(x, v) = 10,9707 \cdot 10^{-6} \sqrt{n}$$

$$\delta T_v = 3,5623 \cdot 10^{-10} \text{ n}$$

$$\frac{T}{2\delta T_v} = 15398,12/\sqrt{n}$$

$$b=0,008 \quad T(x, v) = 11,0866 \cdot 10^{-6} \sqrt{n}$$

$$\delta T_v = 3,6478 \cdot 10^{-10} \text{ n}$$

$$\frac{T}{2\delta T_v} = 15196/\sqrt{n}$$

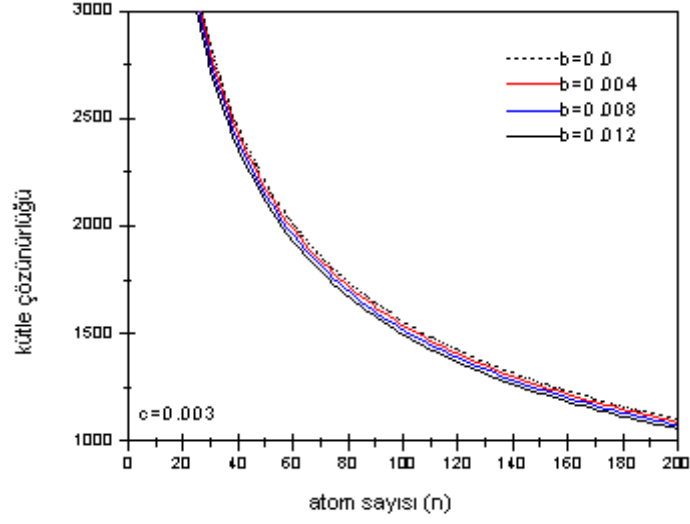
$$b=0,012 \quad T(x, v) = 11,2074 \cdot 10^{-6} \sqrt{n}$$

$$\delta T_v = 3,744016 \cdot 10^{-10} \text{ n}$$

$$\frac{T}{2\delta T_v} = 14967,08/\sqrt{n}$$

olarak elde edildi.

L= 1,5 m ve c= 0,03 için kütle çözünürlüğünün n (atom sayısı) ile değişimi şekil 4.2`de verilmektedir.



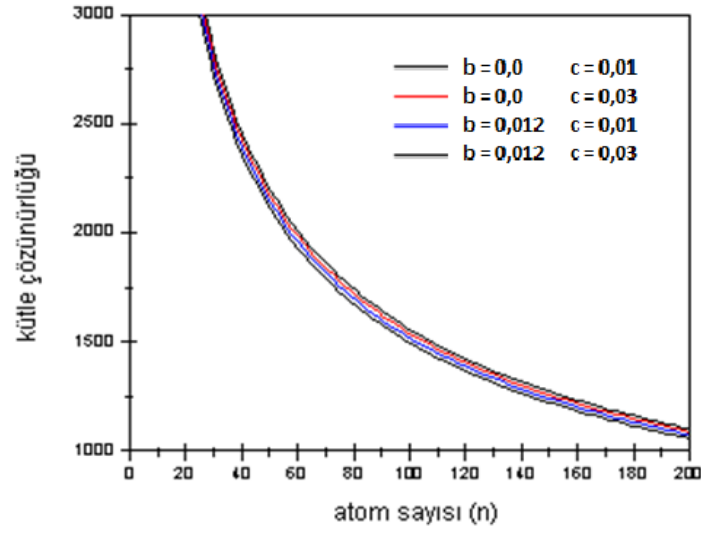
Şekil 4.2. Kütleye çözünürlüğünün n ile değişimi.

4.2 Grafikler ve Sonuçlarının Fiziksel Anlamı

İndirgenmiş ara bölge genişliği b ' nin olmadığı durumda ($b = 0$), toplam uçuş zamanı değeri en küçük olur, dolayısıyla enerji çözünürlüğü en büyük değerini alır. Ara bölgenin b indirgenmiş genişliğinin oluşturulduğu ve giderek artırıldığı durumlarda, parçacığın toplam uçuş zamanı artmakta ve dolayısıyla kütle enerji çözünürlüğü de azalmaktadır. Ayrıca kaynaktan çıkan numunenin atom sayısı çoğaltıldığı zaman enerji çözünürlüğü küçülmektedir. Yani, kütle enerji çözünürlüğü atom sayısı ile ters orantılı olarak değişim göstermektedir. Grafikte dört farklı b değerinin, atom sayısının değişimi ile çözünürlüğünün farklılaşması görülmektedir. Öte yandan aynı şartlarda b ara bölgesinin minimize edildiği durumda çözünürlüğün aynı değerde gerçekleşmesi için daha fazla n atom sayısının gerektiği de görülebilmektedir.

Ara bölge değerleri olan b ' nin değişiminin incelenmesinin yanında bu araştırmamızda, hızlandırma bölgesi (3. bölge) indirgenmiş değeri olan c ' nin de toplam uçuş zamanı, dolanma zamanı ve kütle enerji çözünürlüğüne etkisini göz önüne almıştık. Sonuç olarak c ' nin iki değerinin etkisi incelendiğinde :

c değeri 0,01`den 0,03`e çıkarıldığında toplam uçuş zamanlarında ve dolanma zamanlarında küçük bir artış olduğu görülmüştür. Ancak enerji çözünürlüğünde azalma meydana gelmiştir. Yukarıdaki iki grafik karşılaştırılarak, girilen b ara bölgesi değerlerinin alt ve üst sınırları ($b = 0,0$ ve $b = 0,012$) iki farklı c değerinde yazıldığında, aşağıdaki grafik oluşturulabilir:



Şekil 4.3. Kütle çözünürlüğünün n ile değişimi.

Ayrıca hesaplamalarımızda, dönme zamanı olan δT_v `nin parçacıkların başlangıç hızına bağlı olarak değiştiği ve L serbest uçuş bölgesi uzunluğundan bağımsız olduğu görülür.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Uçuş zamanlı kütle spektrometresinin çözünürlüğü, atom topakları kaynağının spektrometre eksenine dik olduğu ve serbest uçuş bölgesi uzunluğunun $L= 1,5$ m alındığı durumlar için incelenmiştir.

Dört farklı b ara bölgesine karşılık gelen $T(x, v)$ toplam uçuş zamanı, δT_v dönme zamanı ve $(m/\delta m)_v = T/(2\delta T_v)$ kütle enerji çözünürlüğünün hesaplamaları, c hızlandırma bölgesinin (3.bölge) iki farklı değeri için yapılmıştır. Sonuçları açık olarak yazılmıştır.

Enerji çözünürlüğü metodu, kaynağın eksene dik olduğu durumda, b ara bölgesinin katkısının artırılması kütle çözünürlüğünün azalması sonucunu ortaya çıkarmıştır. Ayrıca c hızlandırma bölgesinin artması ile de kütle çözünürlüğünün yine azalması mümkün olmuştur.

Uçuş zamanlı kütle spektrometresinin enerji çözünürlüğünde, ara bölge olarak ifade edilen serbest bölgenin, enerji çözünürlüğüne olan etkisini daha hassas görebilmek için, dönme zamanının küçük olması, dolayısıyla parçacıkların başlangıç hızlarının küçültülmesi gerekir. Bunun için, kaynağın spektrometre eksenine her zaman dik olarak alınması önerilir.

KAYNAKLAR DİZİNİ

- [1] Özsoy, S. , Elektromanyetik Dalga Teorisi, Birsen yayımları, 1998
- [2] Penrose, R. , Fiziğin Gizemi, Kralın yeni usu II., TÜBİTAK yayımları Ankara, 1998 (çev. Tekin Dereli).
- [3] Brown, H. W. ,Poon T. , Introduction to Organic Chemistry, 3rd Edition, Beloit College, 2005.
- [4] Johnson, A. W. , Invitation to Organic chemistry, Janes&Bartlett Publishers, 1998.
- [5] Skoog. D. A. , Holler, F. J. and Nieman, T.A. , Enstrümental Analizin İlkeleri, 1998. (Çev. E. Kılıç, F. Köseoğlu, H. Yılmaz). Bilim Yayıncılık, İstanbul, 846 s.
- [6] Prof. Dr. Ender Erdik, Organik Kimyada Spektroskopik Yöntemler, Ankara Üni. Fen Fakültesi , 2005, gazi kitabevi
- [7] Dr. Cemil Şenvar, Atom, Molekül ve Çekirdek (Fizikokimya cilt 5), Hacettepe Üni. yayımları , 1982.
- [8] Martimer Robert G. , Fizikokimya cilt2 (çev. Prof. Oya Şanlı, Prof. H. İbrahim Ünal). Palme yayımları, 2004
- [9] W. C. Wiley and I. H. McLaren, Rev Sci. Instrum. 26, 1150(1955).
- [10] W. Ade Heer and P. Milani, Rev Sci. Instrum. 62, 670(1991).