

T.C.  
GEBZE YÜKSEK TEKNOLOJİ ENSTİTÜSÜ  
MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DİFERANSİYEL ABSORBSİYON LİDAR İÇİN  
TİTANYUM-SAPPHİRE LASER UYGULAMASI

134335

Sertaç ORAL

YÜKSEK LİSANS TEZİ  
ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ  
ANA BİLİM DALI

TEZ DANIŞMANI  
Doç. Dr. Necati ECEVİT

GEBZE  
2003

134335  
T.C. YÜKSEK TEKNOLOJİ ENSTİTÜSÜ  
MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Sertaç Oral.....'ın tez çalışması, G.Y.T.E. Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun .....13/01/2003..... tarih ve 2003/2 sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından ..Elektronik Mühendisliği.... Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS tezi olarak kabul edilmiştir.

JÜRI

ÜYE

(Tez Danışmanı)



Doç. Dr. Necati Ecerit

ÜYE



Yard. Doç. Dr. Anatoli Siminel

ÜYE

Prof. Dr. Ali Akkurt



ONAY

G.Y.T.E. Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 28.02.2003..... tarih ve 2003/8..... sayılı kararı.

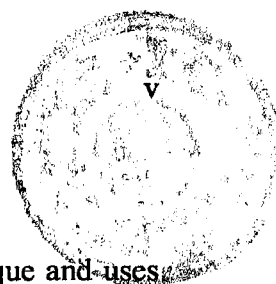
İmza / Mühür

Prof. Dr. Adem KILIÇ  
GYTE Mühendislik ve Fen Bil.  
Enstitüsü Müdürü

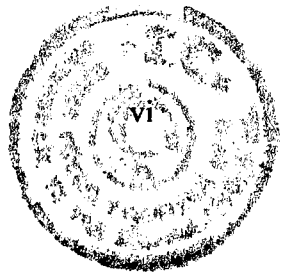
## ÖZET

Bu çalışmada, Titanium Sapphire laser kullanarak DIAL yöntemiyle atmosferdeki kirlilik kaynağı molekül ve parçacıkların uzaktan incelenmesine yönelik bir sistemin tanıtımı yapılmıştır. Bu amaçla öncelikle atmosferin yapısı incelenmiş, atmosferde doğal olarak bulunan ve insan kaynaklı aktiviteler sonucunda açığa çıkan gazlar ve moleküller ile bunların kimyasal yapıları, oluşum şekilleri, atmosferde kalma süreleri, insan sağlığı üzerindeki etkileri açıklanmıştır. Daha sonra laser ışığının atmosferde iletimi kavramı detaylı bir şekilde açıklanmış, bu aşamada soğurma, emisyon ve saçılma kavramları anlatılmıştır. Daha sonra, lidar tekniği temel olarak anlatılmış, bunun temelini oluşturan lidar eşitliği ve bunun çözümü ile ilgili en çok kullanılan yöntemler kısaca gösterilmiştir. Özel olarak ilgilenilmekte olan DIAL kavramı ve bu tekniği kullanmak için gerekli koşullar anlatılmış, bizim örneğimizde incelen nitrojen dioksitle ilgili gerekli bilgiler verilmiştir. Lidar sistemini oluşturan elemanlar temel olarak açıklanmış, en önemli kısımlardan biri olan laser konusu detaylı olarak incelenmiştir. DIAL uygulamalarında en çok kullanılan Ti:Sapphire ve Dye laser sistemleri karşılaştırılmıştır. Son olarak da bu konuda yapılmış çalışmalardan örnek verilerek atmosferin uzaktan izlenmesi amaçlı en kullanışlı sistemlerden olan DIAL tekniğinin tanıtımı tamamlanmıştır.

## SUMMARY



In this work, a system which is used as a remote sensing technique and uses Ti:Sapphire laser as a laser source has been described. For this purpose, firstly, structure of the atmosphere, constituents of the atmosphere both natural and industrial activity caused, chemical properties of these molecules and particles, their effects on human body and atmosphere has been described. Secondly, transmission of the laser light has been analyzed and absorption, emission and scattering topics have been defined. Later, lidar technique, lidar equation and major solution methods have been described. The specific subject DIAL concept has been defined, required conditions and major properties of  $\text{NO}_2$  in terms of DIAL monitoring has been analyzed as an example constituent. Later, components of the lidar system has been described and laser subject has been analyzed in detail. Ti:Sapphire laser has been described as one of the most suitable laser source for DIAL applications and then a comparison with dye laser has been given. Finally, one of the most convenient methods in remote sensing of the atmosphere, DIAL subject, has been finalized with an example in real life application.



## TEŞEKKÜR

Danışmanım Yard. Doç. Dr. Dmitri Dvornokiv'a hem bu tez çalışması ile ilgili hem de dersler sırasında örnek bir bilim adamı tavrı sergileyerek konuları anlamada gösterdiği destekten dolayı özel olarak teşekkür etmek istiyorum. Kendi araştırma konusuyla ilgili bir çalışma yaptığımı belirterek yardımını istediğim ve bu konudaki yayına hazırlanan son makalesini bana göndererek yardımcı olan "Roma Atmosfer ve İklim Bilimleri Enstitüsü" üyesi Prof. Dr. G. P. Gobbi'ye yardımlarından dolayı çok teşekkür ediyorum. Tez ile ilgili araştırmalarım sırasında gösterdiği yardımlardan dolayı Sabancı Üniversitesi Kütüphanesi'ne ve yardımlarıyla işimi çok kolaylaştıran ilgili görevlilerine çok teşekkür ediyorum. Bilkent Üniversitesi ve Boğaziçi Üniversitesi Kütüphanelerine de kaynak edinme konusundaki yardımlarından dolayı teşekkür ediyorum. Böyle değişik ve yararlı olduğuna iandığım bir konuda çalışma yapmama olanak tanıdığı için Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü'ne teşekkür ediyorum.

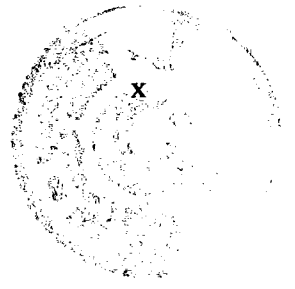
# İÇİNDEKİLER DİZİNİ

## Sayfa

|                                                                                          |      |
|------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| ÖZET                                                                                     | iv   |
| SUMMARY                                                                                  | v    |
| TEŞEKKÜR                                                                                 | vi   |
| İÇİNDEKİLER DİZİNİ                                                                       | vii  |
| SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ                                                           | x    |
| ŞEKİLLER DİZİNİ                                                                          | xi   |
| ÇİZELGELER DİZİNİ                                                                        | xiii |
| <br>                                                                                     |      |
| 1. GİRİŞ                                                                                 | 1    |
| 2. ATMOSFERE GENEL BAKIŞ                                                                 | 2    |
| 2.1. Atmosferin Özellikleri                                                              | 2    |
| 2.2. Atmosferin Yapısı                                                                   | 3    |
| 2.2.1. Troposfer                                                                         | 4    |
| 2.3. Atmosferik Süreçler                                                                 | 6    |
| 2.4. Enerji Isı Transferi                                                                | 7    |
| 2.5. Atmosferdeki Kirletici Maddeler                                                     | 10   |
| 2.5.1. Karbon Oksitler                                                                   | 10   |
| 2.5.2. Karbon Monoksit (CO)                                                              | 12   |
| 2.5.3. Karbon Dioksit (CO <sub>2</sub> )                                                 | 13   |
| 2.5.4. Nitrojen Oksitler                                                                 | 14   |
| 2.5.5. Yer Seviyesinde Ozon (O <sub>3</sub> )                                            | 17   |
| 2.5.6. Parçacık Madde                                                                    | 18   |
| 2.5.7. Sülfür Dioksit (SO <sub>2</sub> )                                                 | 19   |
| 2.5.8. Kurşun                                                                            | 23   |
| 2.5.9. Dünya Sağlık Örgütü (WHO) Tarafından Havadaki<br>Kirleticilerin Sınıflandırılması | 25   |
| 2.5.9.1. Yönelimler                                                                      | 25   |
| 2.5.9.2. Hava Kirliliği                                                                  | 26   |
| 2.6. Atmosferdeki Aerosollar                                                             | 28   |
| 2.7. Troposferik Aerosollar                                                              | 34   |
| 2.7.1. Gezegenel Sınır Katmanı (PBL)                                                     | 34   |

|                                                                                                        |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 2.7.2. Serbest Troposfer                                                                               | 35 |
| 2.8. Stratosferik Aerosollar                                                                           | 36 |
| 3. LASER IŞIĞININ ATMOSFERDE İLETİMİ                                                                   | 38 |
| 3.1. Moleküler Soğurma                                                                                 | 38 |
| 3.1.1. Temel Tanımlar                                                                                  | 38 |
| 3.1.2. Ayrık Bir Hat Tarafından Soğurma                                                                | 41 |
| 3.1.3. Atmosferdeki Gazların Soğurma Spektrasının Genel Karakteri                                      | 44 |
| 3.2. Spektral Hat Kavramı                                                                              | 48 |
| 3.2.1. Atomik Soğurma (Salım) Spektrumu                                                                | 48 |
| 3.3. Moleküler Salım/Soğurma Temel Prensipleri                                                         | 49 |
| 3.3.1. Moleküler Salım/Soğurma Süreçlerinin Temel Fiziksel Prensipleri                                 | 49 |
| 3.3.2. Temel Atmosferik Gazların Soğurma Spektrası ( $H_2O$ , $CO_2$ , $O_3$ , $CH_4$ , $N_2O$ , CFCs) | 54 |
| 3.4. Moleküler Saçılma                                                                                 | 60 |
| 3.5. Parçacık Saçılma                                                                                  | 61 |
| 3.5.1. Saçılma Katsayısı; Soğurma Katsayısı; Zayıflama Katsayısı                                       | 61 |
| 3.5.2. Tek Parçacıktan Saçılma                                                                         | 63 |
| 3.5.3. Beer-Lambert Yasasının Saçılma Üzerine Uygulanabilirliğinin Sınırları                           | 64 |
| 3.6. Toplam Zayıflama: Atmosferin Laser ile Sondası için Etkili Dalga Boyu Bölgeleri                   | 65 |
| 3.6.1. Yoğun Olmayan Atmosfer                                                                          | 65 |
| 3.6.2. Bulutsular                                                                                      | 66 |
| 4. PARÇACIK VE GAZLARIN ELASTİK GERİ-SAÇILMA VE DİFERANSİYEL SOĞURMA YOLUYLA LİDAR ÖLÇÜMLERİ           | 68 |
| 4.1. Laser ile Işığın Tespiti ve Mesafe Tayini Prensipleri (LIDAR)                                     | 68 |
| 4.2. Lidar Eşitliğinin Saçılma Formu                                                                   | 70 |
| 4.3. Diferansiyel Soğurma LIDAR (DIAL) Ölçümlerinin Prensipleri                                        | 75 |
| 4.3.1. DIAL Prensibi                                                                                   | 79 |
| 4.3.2. Troposferik Nitrojen Dioksit                                                                    | 80 |
| 4.4. DIAL Eşitliği                                                                                     | 82 |
| 5. LIDAR EŞİTLİĞİNİN ÇÖZÜMÜ                                                                            | 87 |

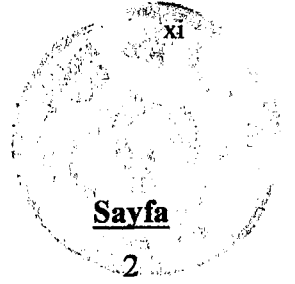
|                                                                                   |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 5.1. Eğim Yöntemi                                                                 | 89  |
| 5.2. Russell Algoritması                                                          | 90  |
| 5.3. Fernald - Klett Çözümü                                                       | 91  |
| 5.4. Lidar Sistemleri ve Cihazları                                                | 93  |
| 5.4.1. Laserler                                                                   | 93  |
| 5.4.2. Alıcı                                                                      | 94  |
| 5.4.3. Bant-geçiren                                                               | 94  |
| 5.4.4. Dedektör                                                                   | 94  |
| 5.4.5. İşaret İşleme                                                              | 94  |
| 5.5. DIAL için Kullanılan Laserler                                                | 95  |
| 5.5.1. The Nd:YAG Laser                                                           | 96  |
| 5.5.2. Excimer Laser                                                              | 97  |
| 5.5.3. Dye Laser                                                                  | 97  |
| 5.5.4. Titanium-Sapphire Laser                                                    | 100 |
| 5.5.5. CO <sub>2</sub> Laser                                                      | 100 |
| 5.5.6. Diyot Laser                                                                | 101 |
| 5.5.7. Titanium-Sapphire ve Dye Laserlerin Detaylı Karşılaştırması                | 103 |
| 5.5.7.1. Titanium Sapphire                                                        | 103 |
| 5.5.7.2. Dye Laser                                                                | 106 |
| 6. DIAL SİSTEMLERİNİN UYGULAMA ÖRNEKLERİ                                          | 111 |
| 6.1. Kirlilik İzleme ve Meteorolojik Uygulamalar için Ti :Sapphire Dial<br>Sistem | 111 |
| 6.1.1. Materyaller ve Metodlar                                                    | 112 |
| 6.1.2. Deneysel Kurulum                                                           | 113 |
| 6.1.3. Sonuçlar                                                                   | 117 |
| 7. SONUÇ                                                                          | 119 |
| KAYNAKLAR                                                                         | 120 |
| ÖZGEÇMİŞ                                                                          | 122 |



## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

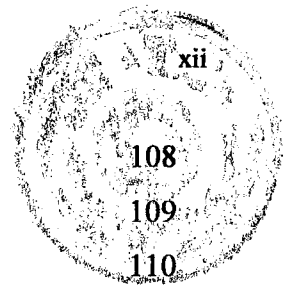
|                      |                                             |
|----------------------|---------------------------------------------|
| LIDAR                | Light Detection and Ranging                 |
| DIAL                 | Differential Absorption Lidar               |
| Ti:Sp                | Titanium Sapphire                           |
| Nd:YAG               | Neodimium Yittrium Aluminium Garnet         |
| UV                   | Ultra-violet                                |
| VIS                  | Visible                                     |
| IR                   | Infrared                                    |
| $I(\nu)$             | Attenuation Coefficient                     |
| $A(\nu)$             | Spectral Absorption                         |
| $T(\nu)$             | Spectral Transmission                       |
| $I(\lambda)$         | Attenuation of a radiation                  |
| $P(\lambda, R)$      | Power at distance R at wavelength $\lambda$ |
| $J(\lambda)$         | Radiance                                    |
| $\kappa(\lambda, R)$ | Total attenuation coefficient               |
| $E(\lambda, R)$      | Energy                                      |

# ŞEKİLLER DİZİNİ



## Şekil

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 2.1. Atmosferi Oluşturan Gazların Yüzde Olarak Dağılımı                                                                                                                                                                                                                                                             | 2   |
| 2.2. Atmosferik Tabakalar                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 3   |
| 2.3. Troposferin Yapısı                                                                                                                                                                                                                                                                                             | 4   |
| 2.4. Etkileşimler Atmosfer ve Okyanus                                                                                                                                                                                                                                                                               | 6   |
| 2.5. Enerjinin Yansıması ve Absorbe Edilmesi                                                                                                                                                                                                                                                                        | 7   |
| 2.6. Isının Yayılma Yolları                                                                                                                                                                                                                                                                                         | 8   |
| 2.7. Nitrojenin Çevrimi                                                                                                                                                                                                                                                                                             | 16  |
| 2.7. Çeşitli Gazların Ve Aerosolların Dünya Çapında Yayılım Kuvvetleri (1850–1990). Aerosolların Atmosfer Üzerindeki Doğrudan ve Dolaylı Etkileri Dikkate Alınmıştır. Belirsizlikler Hata Çubukları Olarak Belirtilmiştir ve Güvenilirlik Seviyeleri De Verilmiştir. (IPCC'nin İzniyle Yeniden Üretilmiştir (1996)) | 30  |
| 2.8. Atmosferdeki parçacık oluşumu içeren aerosollarla ilgili süreçler                                                                                                                                                                                                                                              | 35  |
| 3.1. Soğurma ve Salım                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 48  |
| 3.2. İki Atomlu ve Üç Atomlu Atmosferik Moleküllerin Titreşimsel Modları                                                                                                                                                                                                                                            | 52  |
| 3.3. Temel Atmosferik Gazların Düşük Çözünürlüklü IR Soğurma Spektrası                                                                                                                                                                                                                                              | 55  |
| 3.4. Atmosferin Üst Kısımında ve Yüzeyde Güneş Kaynaklı Işık Yoğunluğu (Flux).                                                                                                                                                                                                                                      | 57  |
| 4.1. Ozon ve NO <sub>2</sub> 'nin DIAL ölçümleri için UV ve Görünür Mavi Bantlar                                                                                                                                                                                                                                    | 76  |
| 4.2. Genel olarak DIAL Kavramı                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 78  |
| 4.3. NO <sub>2</sub> Soğurma Spektrası                                                                                                                                                                                                                                                                              | 81  |
| 5.1. DIAL Ölçümleri İçin Uygun 6 Tip Laser Yapısı Ve Karakteristiği                                                                                                                                                                                                                                                 | 99  |
| 5.2. Ti:Sapphire Enerji Seviyeleri                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 103 |
| 5.3. Polarizasyon                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | 103 |
| 5.4. Ti Kristal Yapısı                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 104 |
| 5.5. Ayarlanabilir Laser Kaynağı Olarak Dye Laserin Kaldırılması Kızıl ve Yakın IR bölgede (660 – 1180 nm); frekans çiftleme: 335 nm – 525 nm                                                                                                                                                                       | 105 |
| 5.6. Molekül Yapısı                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | 106 |
| 5.7. Soğurma ve Floresan Bantları                                                                                                                                                                                                                                                                                   | 106 |
| 5.8. Enerji Seviyeleri                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 107 |



5.9. Dye Karakteristiği

5.10. Darbeli alışma İçin Temel Yapı

5.11. Jet-Stream Dye Laser

6.1. DIAL Sistemi Blok Diyagramı

6.2. Kırsal bölgede  $\lambda_{ON} = 448.25\text{nm}$  ve  $\lambda_{ON} = 446.83\text{nm}$ 'de  $\text{NO}_2$  için Lidar

İşaretleri

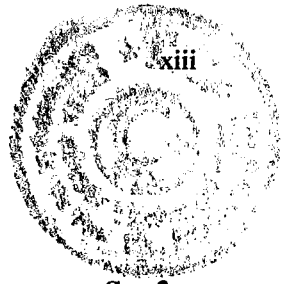
6.3 Kırsal Alanda Su Buharı Karışma Oranı

114

117

118





## ÇİZELGELER DİZİNİ

### Cizelge

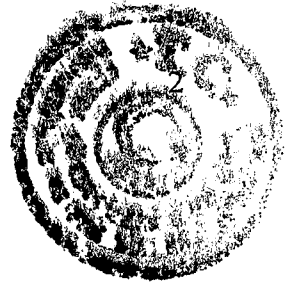
### Sayfa

|                                                                                                                                                            |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 2.1. Ölüme Sebep Olan Önemli Hava Kirliliği Felaketleri                                                                                                    | 22  |
| 2.2. İngiltere İçin Belli Başlı Kirleticilerin 1989 Değerleri, 10 <sup>3</sup> Ton Birim Alınmıştır                                                        | 23  |
| 2.3. Atmosfere Yayılan Temel Gazlar ve Kaynakları                                                                                                          | 24  |
| 2.4. WHO Belirli Kirleticiler İçin Rehber Değerler (1999)                                                                                                  | 27  |
| 3.1. H <sub>2</sub> O, CO <sub>2</sub> , O <sub>3</sub> , CH <sub>4</sub> , N <sub>2</sub> O, ve CFCler İçin En Önemli Titreşimsel ve Rotasyonel Geçişler. | 56  |
| 3.2. Çeşitli Gazların Güneş Işığı Spektrumundaki (UV + Görünür) Soğurma Dalga Boyları                                                                      | 58  |
| 4.1. Gaz Kirleticilerin DIAL Teknolojisi İle Ölçümleri İçin Genel Sistem Özellikleri                                                                       | 77  |
| 5.1. Laser Tabanlı Spektroskopik Yöntemlerin Karşılaştırılması                                                                                             | 102 |
| 6.1. Kirleticiler Dalga Boyları ve Karıştırma Süreçleri                                                                                                    | 115 |
| 6.2. Interferans İçin Filtre Özellikleri                                                                                                                   | 116 |



# 1 GİRİŞ

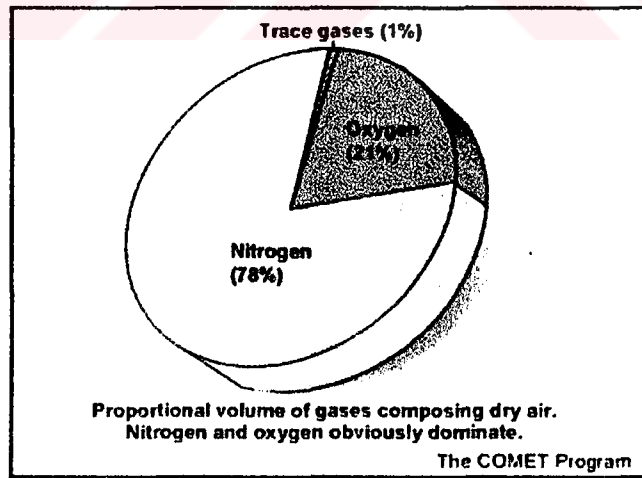
Bu çalışmada laser radar (lidar) tekniği tanıtılmıştır. Bir uzaktan algılama tekniği olan lidarın tanıtılmasında, bir özel hali olan DIAL (Differential Absorption Lidar) sistemleri incelenmiştir. Bir çok kullanım alanı olan Lidar sistemleri özellikle atmosferde mevcut parçacık ve moleküllerin, en çok da insan kaynaklı hava kirliliğine sebep olan moleküllerin uzaktan miktarlarının belirlenmesi amacıyla kullanılmaktadır. Bunun yanında, ağır silahların çalışma sırasında ortama yaydığı az yanmış petrol atıklarını tespit ile askeri amaçlı kullanımı da söz konusudur. Temel kullanım amacı olan atmosferdeki moleküllerin tespiti amacıyla kullanılan başka pek çok yöntem mevcut olmakla birlikte, uzaktan uygulanabilmesi ve ilgilenilen örneklere temas gerektirmemesi, oldukça yüksek çözünürlüklü veri elde edilebilmesi ve özellikle de yeni geliştirilen laserler kullanılarak mobil sistemler de geliştirilebilmesi bakımından diğer yöntemlere karşı lidar oldukça avantajı olan bir tekniktir. DIAL sistemi içerdiği fark mantığı çerçevesinde bilinmeyen bir çok parametreyi gereksiz hale getirerek oldukça kullanışlı bir çözüm önermektedir. Bu çalışmada özel olarak incelenen Titanium Sapphire laser de sistemin farklı dalga boylarında kolaylıkla ayarlanabilmesi sayesinde farklı moleküller için kullanılabilmekte ve taşınabilirliği sayesinde de mobil sistemler geliştirilebilmektedir.



## 2 ATMOSFERE GENEL BAKIŞ

### 2.1 Atmosferin Özellikleri

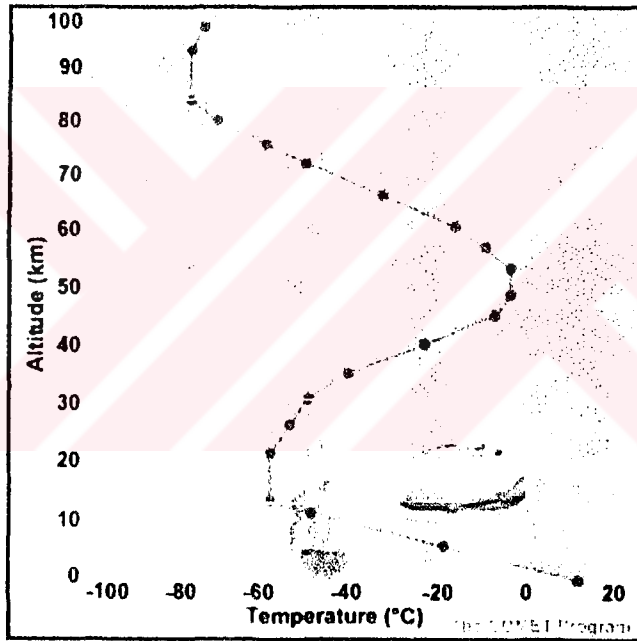
Gezegemizi saran ince atmosfer tabakası, her bir kendine has özellikler içeren gazların karışımından oluşur. Bu karışım, içeriği oluşturan gazlarca eşit olarak paylaşılmamıştır. İki element, nitrogen ve oksijen, havanın % 99'unu oluşturur. Kalan % 1 “trace gases” denilen nadir rastlanan gazlardan oluşur ve bunların içinde en çok rastlanana da asal gaz olan argon'dur. Bu nadir gazların diğerleri de oldukça az miktarlarda bulunmalarına karşın, yaşamsal olarak oldukça önemlidirler. Bunların en önemli ikisi, karbon dioksit ve ozon, atmosferik hareketler açısından oldukça önemlidir.



Şekil 2.1- Atmosferi oluşturan gazların yüzde olarak dağılımı

Bir diğ er gaz, su buharı da, oldukça düşük miktarlarda da olsa mevcuttur. Konsantrasyonu     ller üzerinde neredeyse hiç yokken okyanuslar üzerinde yaklaşık % 4 seviyesine varacak şekilde farklılık gösterir. Su buharı havanın olu  şumu açısından önemlidir çünkü; gaz, sıvı ve katı hallerde bulunabilir ve dünyadan yansıyan enerjiyi absorbe eder.

## 2.2 Atmosferin Yapısı

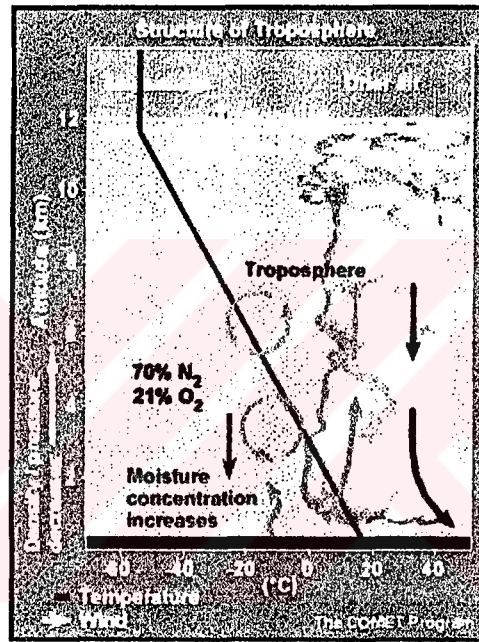


Şekil 2.2- Atmosferik tabakalar

Atmosfer, sıcaklığa bağlı olarak dört katmandan oluşmaktadır: **troposfer**, **stratosfer**, **mezosfer**, ve **termosfer**. Bizim de yaşamakta olduğumuz katman olan troposfer bizim için en önemli tabakadır.

## 2.2.1 Troposfer

Troposfer kelimesi **tropein**'den gelir, anlamı dönmek, değişmektir. Dünya üzerindeki tüm hava hareketleri bu tabakada olur.

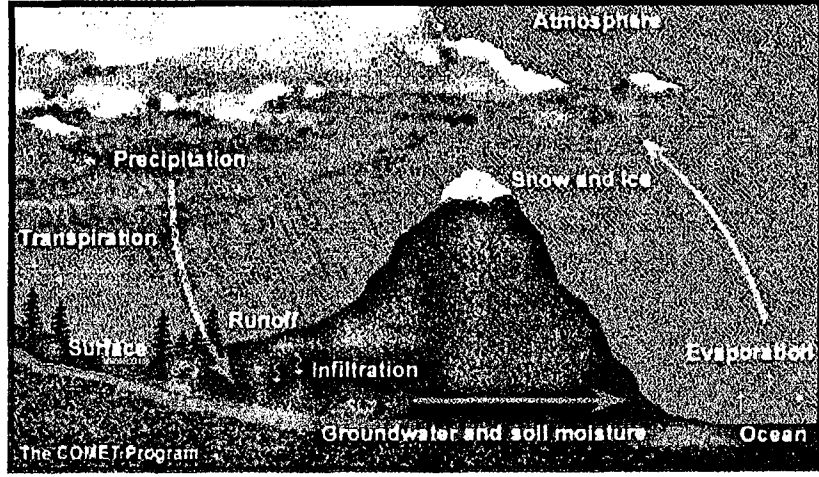


Şekil 2.3- Troposferin yapısı

Troposfer aşağıdaki karakteristik özelliklere sahiptir.

- Dünya yüzeyinden itibaren yaklaşık 12 km yüksekliğe kadar uzanır.
- Basınç, 1000 ile 200 millibar arasında değişir.
- Sıcaklık genellikle tropopause'ye (troposferin üst kısmı) kadar yükseklikle artar; bu yaklaşık 200 millibar veya 36,000 ft'e eşittir.
  - Sıcaklık yüzeyde yaklaşık olarak  $15^{\circ}\text{C}$ 'dir ( $59^{\circ}\text{F}$ ) ve tropopause'de  $-57^{\circ}\text{C}$ 'dir ( $-71^{\circ}\text{F}$ ).
  - Bu tabaka sıcaklığın artık yüksekliğe bağlı olarak değişmediği noktada biter. Tropopause olarak bilinen bu alan, stratosphere geçiş bölgesidir.
- Rüzgarlar yükseklikle birlikte jet akıntısına varacak kadar artar.
- Nem yoğunluğu yükseklikle birlikte tropopause'ye kadar azalır.
  - Tropopause'nin üzerinde stratosferde hava daha kurudur.
  - Dünya yüzeyini ısıtan güneş ısıtı yukarıya doğru ağırlıklı olarak konveksiyon yoluyla iletilir, yukarı ve aşağı hava akımları tarafından karıştırılır.

## 2.3 Atmosferik Süreçler



Şekil 2.4- Etkileşimler – Atmosfer ve Okyanus

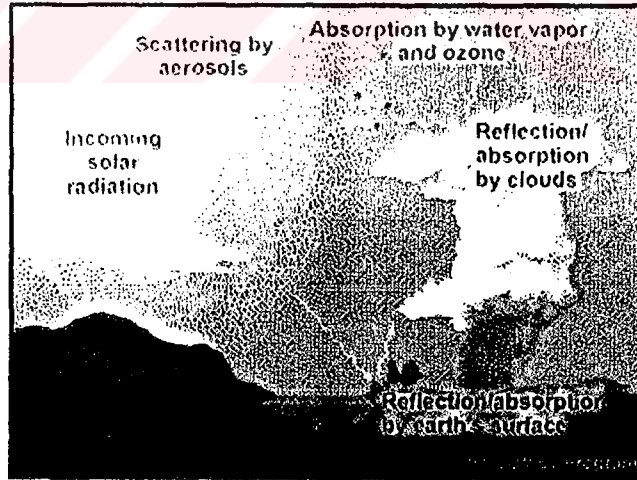
Bildiğimiz gibi su, dünya eko-sisteminin önemli bir parçasıdır. Okyanuslar dünya yüzeyinin yaklaşık % 75'ini kaplar ve ısı ile nemin atmosferdeki iletimi açısından önemli bir rol oynar.

- Atmosferdeki su buharının çok büyük bir kısmı okyanuslardan gelir.
- Karalar üzerine yoğunlaşarak düşen su, bir yolunu bularak tekrar okyanusa döner.
- Yaklaşık üçte ikisi, suyun çevrimi yoluyla atmosfer geri döner.

Okyanuslar ile atmosfer arasında önemli etkileşimler vardır. Okyanuslar atmosferin en önemli nem kaynağı oldukları gibi aynı zamanda, ısı kaynağı ve ısı depolama ortamı olarak da görev görürler.

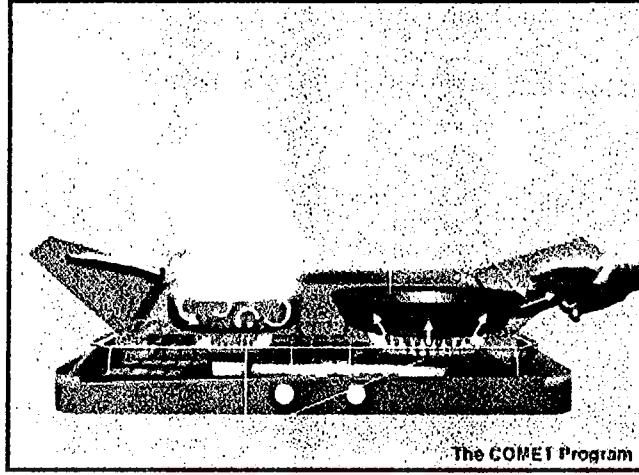
Isı ve nem alışverişinin, okyanuslar yakınındaki ve üzerindeki atmosferik hareketler üzerinde çok önemli etkileri vardır. Okyanus akıntıları ısının kutuplara doğru aktarılmasında önemli bir rol oynar. Önemli akıntılar, örneğin kuzeye doğru akan Gulf Stream, oldukça önemli miktarlarda ısının kutuplara doğru taşınmasını sağlar ve bu şekilde bir çok hava hareketinin oluşmasında rol oynar. Bunlar ayrıca yakınlarındaki yerlerin iklimlerini ısıtma konusunda etkilidirler. Bunun tersi olarak, güneye doğru akan soğuk akıntılar, örneğin California Current, yakınındaki bölgelerin iklimini soğutur.

## 2.4 Enerji Isı Transferi



Şekil 2.5- Enerjinin yansıtması ve absorbe edilmesi

Pratikte dünyaya ulaşan enerjinin tümü güneşten gelir. Gelen enerji ilk olarak atmosfer ile karşılaşır ve küçük bir kısmı burada ozon ve su buharı gibi belirli gazlar tarafından doğrudan absorbe edilir. Enerjinin bir kısmı da bulutlar ve dünya yüzeyi tarafından uzaya geri yansıtılır.



Şekil 2.6- Isının yayılma yolları

Dünya yüzeyi ile atmosfer arasındaki enerji transferi; iletim, yayınım ve radyasyon yoluyla olur.

**İletim**, ısı enerjisinin komşu moleküllere temas yoluyla iletilmesidir. Bazı katılar, örneğin metaller, iyi birer ısı iletkeniyken bazıları da, örneğin odun, kötü iletkenlerdir. Hava ve su nispeten kötü iletkenlerdir. Hava kötü bir iletken olduğu için, iletim yoluyla ısı transferinin büyük bir kısmı dünya yüzeyinde olur. Geceleri, yer yüzeyi soğur ve soğuyan zemin ısıyı komşu hava molekülleri aracılığı ile uzaklaştırmış olur. Gün boyunca güneş ışınları zemini ısıtır ve bu da komşu hava moleküllerini iletim yoluyla ısıtır.

**Yayınım**, maddenin içinde moleküllerin grup halinde bir yerden bir yere taşınmasıyla ısının taşınmasının sağlanmasıdır. Yayınım, hava ve su gibi akışkan maddelerde gözlenir.

Atmosferde yayınım, büyük hava kütlelerinin ve küçük hava tabakalarının yükselmesi ve çökmesi şeklinde olur. Bu dikine hareketler ısı ve nemin etkin bir şekilde atmosferde dağılımını sağlar ve bulut ve fırtına oluşumu (yükselme hareketi olduğunda) ile yağışlara (çökme hareketi olduğunda) sebep olur.

**Radyasyon**, iletimde maddenin rol almadığı bir ısı transferidir. Radyasyon ısıyı vakum ortamında iletir.

Enerji güneşten dünyaya elektromagnetik dalgalar halinde gelir. Dalga boyu ne kadar küçük olursa taşıdığı enerji o oranda artar.

## 2.5 Atmosferdeki Kirletici Maddeler

Hava kirliliği, insan kaynaklı süreçler sonrasında atmosfere salınan gaz ve parçacıkların karışımından oluşur. Bu salınan maddeler genellikle kömür, petrol gibi fosil kökenli enerji kaynaklarının yakılması sonucu açığa çıkar.

Kirliliği yaratan insan olduğu halde, bir kere havaya karıştıktan sonra sonuçların ne olacağını belirleyen ana kaynak havadır. Yağışlı veya rüzgarlı havalarda kirlilik nispeten düşük seviyededir, rüzgar sayesinde ortamdan uzaklaştırılır ve dağıtılır ya da yağmur ile hava temizlenir. Belirli bazı koşullar altında kirlilik seviyesi “kirlilik dönemleri” denilen zararlı seviyelere yükselebilir.

Aşağıda temel kirletici maddeler, bunların kaynakları, sağlık üzerindeki etkileri açıklanmıştır.

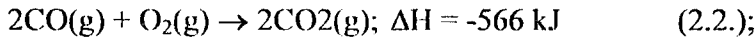
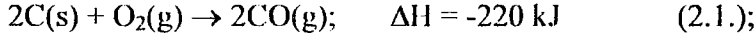
### 2.5.1 Karbon Oksitler

Karbon monoksit ve karbon dioksit en çok açığa çıkan kirletici maddelerdir. Ana kaynakları:

- Organik maddelerin ayrıştırılması
- Metanın oksidasyonu

- Fosil kaynaklı yakıtların yanması

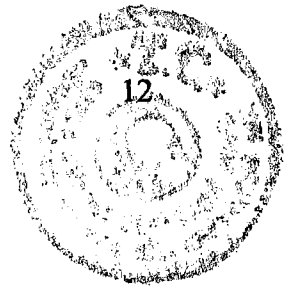
Karbonun oksidasyonu aşağıdaki şekilde özetlenebilir:



İkinci reaksiyon, güçlü  $C \equiv O$  bağlarından dolayı aşılması gereken aktivasyon enerjisinin yüksekliği sebebiyle yavaştır.

Bataklıklardaki metanın oksidasyonu sonucunda ve tropiklerdeki organik maddelerin oksidasyonu sonucunda doğal olarak ortaya çıkan karbon monoksitin, insan kaynaklı aktivitelerden kaynaklanan miktardan fazla olması şaşırtıcı olabilir. Karbon monoksitin insan kaynaklı olarak açığa çıktığı miktarlar, dünya çapındaki miktar üzerinde değişiklik yapacak kadar etkili değildir ancak, nüfusun yoğun olduğu yerlerde yerel olarak problem yaratacak yoğunluklar söz konusu olabilir.

İnsan kaynaklı olarak atmosferdeki karbon oksitlerinin temel kaynağı, taşıma amacıyla yakıtların yakılmasıdır. Karbon monoksit için, en önemli kaynak (% 56) içten yanmalı motorlarda yanan petroldür. Petrolün yakılması salınan karbon dioksitin % 31'inin kaynağıdır. Karbon monoksitin oldukça önemli bir kısmı bekleme ve yavaşlama sürecinde ortaya çıkar çünkü, bu sırada yakılan karışım petrol açısından daha zengindir. Bu koşullar, karbon dioksit salınımının en düşük olduğu koşullardır.



## 2.5.2 Karbon Monoksit (CO)

Karbon Monoksit (CO), renksiz, kokusuz ve zehirli bir gazdır; soğuk veya ayarsız motorların yakıtı tam veya etkili kullanamaması sonucu oluşur.

Gaz, oksijenin kan yoluyla vücutta dolaşımını etkiler. Çok yüksek seviyelerde, özellikle kalp problemi olan kişilerde, kalbe taşınan oksijende ciddi kayıplara sebep olabilir. Solunduğunda, CO, görevi oksijeni taşımak olan hemoglobin (Hb) ile birleşir. CO'nun hemoglobin ile birleşme eğilimi oksijene göre 240 kat daha fazla olduğu için, bu dönüşümlü tepkimenin sonucu akciğerlerden kalbe taşınan oksijenin ciddi şekilde azalmasıdır.

CO'nun ortamdan kaldırılması için etkin yollar vardır. Bunlar aşağıda verilmiştir:

Tropopause katmanının hemen üstünde karbon monoksit aşağıdaki şekilde yok olur:



$\bullet\text{OH}$ , suyun fotolizinden sağlanır





ve



Trafik, karbon monoksitin önemli kaynaklarından birisi olduğundan, kalabalık yolların yakınında ortamdaki yoğunluğu daha fazladır.

### 2.5.3 Karbon Dioksit (CO<sub>2</sub>)

Karbon monoksitin aksine, karbon dioksit (CO<sub>2</sub>) 'tamamıyla' fosil kaynaklı yakıtların yanması sonucu oluşur. Ortamda mevcut seviyesi itibarıyla sağlığı doğrudan tehdit etmemesine rağmen, 'sera etkisine' katkısı olan en önemli gazlardan birisidir. En önemli kaynakları; yol taşımacılığı, güç istasyonları ve diğer endüstriyel yanma işlemleri ile evlerin ısıtmasıdır.

İklim, sıcaklığın global dengesine bağlıdır. Sıcaklıktaki 2-3°C'lik bir değişim, iklimi yerel ve global düzeyde ciddi şekilde etkiler. Atmosfere giren enerjinin %47'si dünya yüzeyine ulaşır. Gelen enerji, 483 nm dalgaboyunda maksimum yoğunluğa sahiptir. Yeniden yayılan enerji infrared (2,000 – 40,000 nm) bölgesindedir ve maksimum yoğunluğu 10,000 nm'dedir. Infrared bölgesindeki bu enerjinin bir kısmı atmosferdeki su buharı ve karbon dioksit tarafından absorbe edilir ve tekrar yayılır. Dünyanın 14°C'deki ortalama sıcaklığı bu süreç sayesinde sağlanır. Eğer su buharı ve karbon dioksit tarafından tekrar yayılan bu enerji olmasaydı dünyanın sıcaklığı yüzeyde -20 °C to -40 °C civarında olurdu. Dünya yüzeyini nispeten sıcak tutan bu etkiye "sera etkisi" denir.

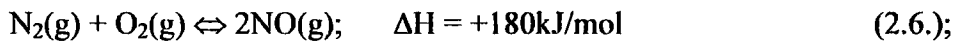
Atmosferdeki kirletici maddelerin yoğunluğu, hacimdeki milyon başına parçacık (ppmv) ile ölçülür. Bu ölçü yoğunlukların çok düşük olduğu durumlar için kullanılır. Bir milyon hava molekülü içinde adı geçen maddeden ne kadar parçacık bulunduğunu gösteren bir ölçüdür; 350 ppmv, % 0.035'lik bir orana karşılık gelir.

#### 2.5.4 Nitrojen Oksitler

Nitrojen oksitler oldukça önemli kirletici maddelerdir, hidrokarbonlarla birlikte fotokimyasal hava kirliliğinden sorumludurlar. Asit yağmurlarının da en önemli sebeplerindendir. Nitrojen oksit çıkışının % 40'ı motorlu taşıtlardan, % 30'u kömür ve petrol ile çalışan enerji istasyonlarından, % 20'si fosil kaynaklı yakıtların endüstriyel amaçlarla yakılmasından ve % 10'u da diğer kaynaklardan gelir.

Temel kirletici oksitler, nitrojen monoksit, NO, ve nitrojen dioksit, NO<sub>2</sub>, genellikle birlikte anılır ve NO<sub>x</sub> olarak adlandırılır.

Nitrojen, N<sub>2</sub>, için oksidasyon sayısı 0'dır. Kararlıdır ve kolay tepkimeye girmez. Bununla birlikte, yüksek sıcaklıklarda oksijen ile birleşir ve nitrojen monoksiti oluşturur:



298 K'de, eşitliğin pozisyonu sola doğrudur, fakat içten yanmalı bir motorun içindeki yüksek sıcaklıklarda (2000 K) dikkate değer miktarda nitrojen oksit açığa çıkar. Egzos hızlı bir şekilde soğur ve bu da nitrojen monoksitin ayrışmasını engeller, bu

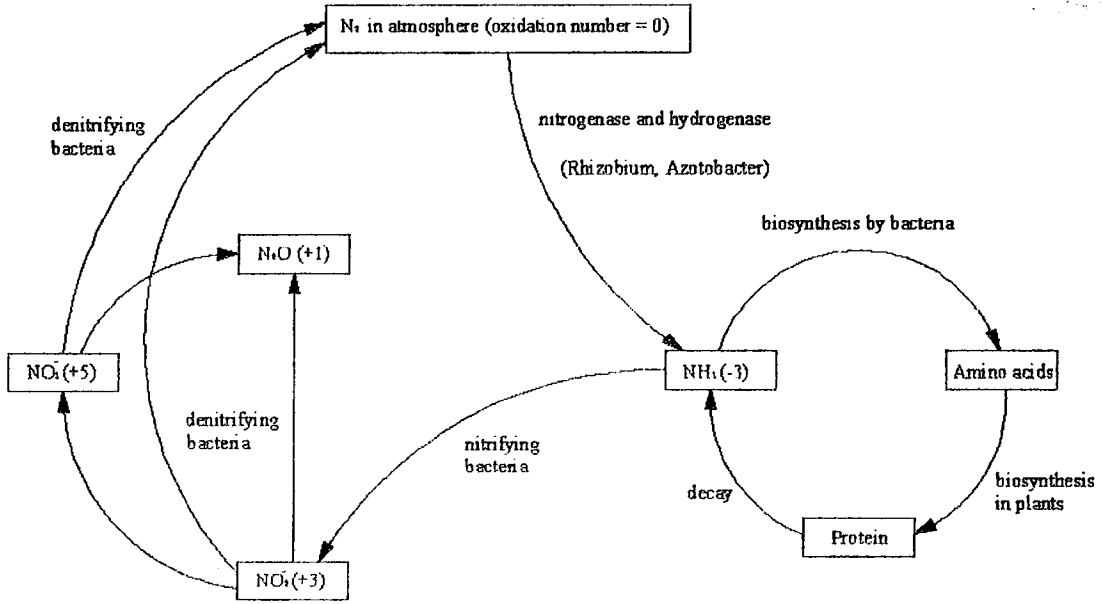
yüzden de nitrojen monoksit birincil bir kirlilik kaynağıdır. Nitrojenin çevrimi Şekil 2.7’de görülebilir.

Nitrojen dioksit, nitrojen oksitin, oksijen ile tepkimesinden oluşur. Bu yüzden ikincil bir kirlilik kaynağıdır.



Fotokimyasal sis, değişik kimyasallar içeren beyazımsı sarı bir hava kitlesidir, ve solunum yolunu tahriş eder. Fotokimyasal sisi oluşturan kimyasallar; nitrojen monoksit, nitrojen dioksit, hidrokarbonlar, peroxyethanoyl nitrat (PAN), ozon ve aldehitlerdir. Nitrojen monoksit ve hidrokarbonlar birincil kirleticilerdir.

Fotokimyasal sis için gereken koşullar, kirletici gazların belirli bir karışımı, güneş ışığı, düzenli bir sıcaklık dönüşümü ve tepeler tarafından kapatılmış bir arazidir. Nitrojen monoksit oksidasyona uğradıkça nitrojen dioksit oluşur. Daha sonra, karmaşık bir dizi tepkime sonrasında fotolizi takiben nitrojen dioksit yağunluğu düşer, bunun sonucunda da ozon, aldehitler ve peroxyinitratlar oluşur. Nitric asitler,  $\text{HNO}_2$  ve



Şekil 2.7 Nitrojenin çevrimi

$HNO_3$ , nitrojen oksitlerin su ile tepkimesinden oluşur ve yağmur ya da aerosol oluşumu ile ortadan kaldırılır. Akşamları görülen yoğun trafikte oluşan nitrojen oksitler ve hidrokarbonlar ozon ile tepkimeye girerek ortamdan temizlenirler, bu da ozon seviyesinin düşmesine sebep olur. Atmosferin alt seviyelerindeki ozon, oldukça tehlikeli bir kirletici maddedir.

$NO_2$  ışığın mavi bandını absorbe eder ve kahverengimsi bir hava tabakası olarak gözlenir, “is” olarak da adlandırılır. Yüksek yoğunluk seviyelerinde  $NO_2$ , astım gibi kronik akciğer rahatsızlıklarına sebep olabilir.

### 2.5.5 Yer Seviyesinde Ozon (O<sub>3</sub>)

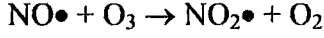
Atmosferin üst tabakalarındaki 'ozon tabakası' dünyayı korurken, yer seviyesindeki ozon ('O<sub>3</sub>') sağlık açısından zararlıdır. Ozon doğrudan salınmaz, nitrojen oksitler ve hidrokarbonları içeren ortamda güneş ışığının da varlığında karmaşık bir dizi tepkime sonrasında oluşur. Doğal olarak, kirliliğin olmadığı koşullarda, güneş ışığının nitrojen dioksiti parçalayarak ozonu oluşturmasıyla ve bunun nitrik asitle tepkimeye girip nitrojen dioksiti oluşturması arasında bir denge vardır. Geceleri, tepkimenin ilk kısmını gerçekleştirecek güneş ışığı olmadığı için, ozon yok edilir ama yerine yenisi oluşmaz.

Yanma sonucu oluşan hidrokarbonların bulunduğu kirlilik durumunda, denge bozulur. Hidrokarbonlar aynı zamanda daha sonra ozona dönüşecek olan nitrojen dioksite dönmelerini sağlayacak tepkimeler yaparlar. Sonuç olarak, nitrojen dioksit ve ozonun artan seviyeleri, yazları görülen "is"e sebep olur.

Yer seviyesinde ortamdaki normal ozon seviyesi 20-50 ppbv'dir. Bu ozon temel olarak stratosferden gelen hava ile karışımdan kaynaklanmaktadır. Bunun üzerindeki ozon seviyeleri nitrojen oksitler ile tepkimeler sonucu oluşur:



**YATIRIM MENKUL  
DEĞERLER A.Ş.**



(2.11.);

Burada M, tepkime sonucu açığa çıkan aşırı enerjiyi taşıyabilecek herhangi bir gaz molekülüdür. Tüm elemanlar gaz halindedir

Ozon, dünya yüzeyinden yansıyan infrared ışınımı absorbe eder, bu yüzden troposferdeki ozon 'sera etkisi' sebebidir.

Araçların egzozlarından açığa çıkan nitrojen oksitlerin büyük bir kısmı nitrik oksit formundadır. Ozonu yok eden nitrik oksit olduğu için, yoğun trafik olan yolların yakınında ozon seviyesi düşüktür. Aynı sebepten, yerleşimin olmadığı yerlerde ozon seviyesi şehirlere göre daha yüksektir.

Nitrojen dioksit gibi, ozonun da yüksek seviyeleri akciğerlerde rahatsızlığa sebep olur. Ayrıca gözlerde tahriş, migren ve öksürüğe de sebep olabilir. Aynı zamanda oldukça kuvvetli bir oksitlendiricidir. Bu da lastik ve pigmentler gibi maddelerle tepkimeye girmesi ve sebzelere zarar vermesi anlamına gelmektedir.

Ozon bir kere meydana geldikten sonra, günlerce atmosferde kalır ve oldukça uzun mesafelere taşınabilir.

### 2.5.6 Parçacık Madde

Atmosferdeki parçacık maddenin bir çok kaynağı olabilir. Bunlar, kum veya deniz suyu gibi doğal kaynaklı olabileceği gibi, inşaat tozu veya kurum gibi insan kaynaklı

da olabilir. “Kara duman” olarak da bilinen bu tür kirliliğe, kömür tüketiminin azalması nedeniyle artık çok daha az rastlanıyor.

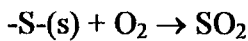
Artık PM10 olarak adlandırılan daha küçük parçacıklar üzerinde dikkat yoğunlaşmıştır. Bu küçük parçacıkların solunum yoluyla akciğerlere taşınması ve zehirli etki göstermesi olasılığı, büyük parçacıklarınkine göre daha fazladır. PM2.5 olarak bilinen daha da küçük parçacıklar üzerinde çalışmalar yoğunlaşmaktadır.

Parçacık ne kadar küçük olursa, atmosferde asılı kaldığı süre de o kadar uzun olmaktadır. Yanma sonucunda karbondan oluşanlar ve çeşitli kimyasal bileşenler (sulfatlar ve nitratlar) gibi oldukça küçük parçacıklar atmosferde haftalarca kalabilirler. Bu parçacıklar kilometrelerce sürüklenebilirler ve bir çok yerde kirliliğe sebep olabilirler. Parçacık madde, bir çok farklı kaynaktan gelen bir çok farklı maddeden oluştuğu için kontrol edilmesi oldukça zordur.

### 2.5.7 Sülfür Dioksit (SO<sub>2</sub>)

Sülfür (kükürt) dioksit tehlikeli bir birincil kirleticidir. İnsanlara, bitkilere ve bir çok maddeye zarar verir. Sülfür dioksitin havada kalma süresi hava koşullarına bağlı olarak 3-7 gündür, yağışlı havalarda havadan daha kolay temizlenmektedir.

Sülfür dioksit ('SO<sub>2</sub>', sülfür içeren bir madde ya da yakıt yakıldığında ortaya çıkar. Global olarak, atmosferdeki sülfür dioksitin büyük bir kısmı doğal kaynaklardan gelmektedir. Kömürdeki sülfür, yanma sonucunda sülfür dioksit olarak açığa çıkar:



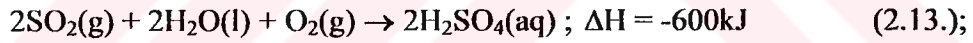
(2.12.);

Ham petrol içinde az miktarda sülfür vardır, fakat, rafine edilmesi sırasında yoğunluğu artırılır ve zengin bir karışım elde edilir. Enerji istasyonlarında kullanılan yakıt budur. Taşıtlarda yakıt olarak kullanılan petrol yaklaşık % 0.05 sülfür içerir.

Endüstriyel olmayan alanlarda ortamdaki sülfür dioksit yoğunluğu kabaca 0.1 ppbv'dir (parts per billion by volume). Şehirlerde maksimum seviyelere fosil kaynaklı yakıtların yakılması sebebiyle kışın ulaşılır.

Atmosferdeki sülfür dioksit okside olur ve ikincil bir kirletici olan sülfür trioksite dönüşür, sonra da su ile tepkimeye girerek sülfürik asite dönüşür.

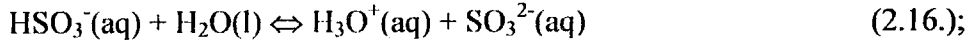
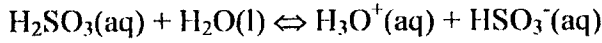
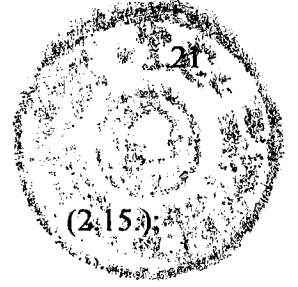
Tüm oksitlenme süreci aşağıdaki eşitlikte özetlenmiştir:



Tepkime yavaştır fakat, metal iyonları içeren aerosoller, örneğin; manganez (II), demir (III) ve bakır (II), ile krom, alüminyum, kurşun ve kalsiyum oksitler içeren aerosoller tarafından hızlandırılır. Değişken oksidasyon sayıları nedeniyle metal iyonları hızlandırma işine yararlar. Binaların yüzeyleri ve yüksek nem de hızlandırıcı olarak etkili olurlar.

Sülfür dioksit su damlası içinde çözüldüğünde tepkimeler şunlardır:





Asiditenin artması, sülfür dioksitin su damlası içindeki çözünürlüğünü azaltır.

Amonyanın varlığı, asiditeyi azaltarak oksidasyon miktarını artırır, sonucunda da amonyum sülfat,  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ , ve amonyum hidrojen sülfat,  $\text{NH}_4\text{HSO}_4$ , oluşur.

Asit yağmuru, sülfür dioksitin su içinde çözünerek sülfürous ve sülfürik asite dönüşmesinden oluşur,  $\text{H}_2\text{SO}_3$  and  $\text{H}_2\text{SO}_4$ . Saf yağmur suyunun pH değeri 5.6'dır, fakat sülfür dioksit bunun 2'ye kadar düşmesine sebep olabilir. Sülfür dioksit, asit yağmurunun esas sebebidir fakat, enerji istasyonlarından ve motorlu taşıtlardan gelen nitrojen oksit de (nitrojen oksitler su damlalarının içinde çözünerek bir dizi karmaşık tepkime sonrasında nitrik asite dönüşürler) bunun oluşumuna katkıda bulunur.

Sülfür dioksit, sağlığın ciddi şekilde tehdit edildiği önemli hava kirliliği felaketlerinde baş rolü oynamıştır (Çizelge 1.1). Duman ve sisin birleşimi ile oluşan bu kirli hava tabakasına ingilizcede iki kelimenin birleşimi olarak "smog" denmektedir.

| Yer                          | Tarih                   | Süre/gün | Ölüm |
|------------------------------|-------------------------|----------|------|
| Meuse Valley, Liege, Belgium | Aralık 1930             | 3        | 60   |
| Donora, Pennsylvania, USA    | Ekim 1948               | 5        | 20   |
| London, UK                   | Aralık 1952             | 5        | 4000 |
|                              | Ocak 1956               | 3        | 1000 |
|                              | Aralık 1957             | 3        | 800  |
|                              | Aralık 1962             | 5        | 700  |
| New York, USA                | Ocak'dan<br>Şubat'a1963 | 15       | 400  |
|                              | Kasım1966               | 3        | 168  |

Çizelge 2.1 Ölüme sebep olan önemli hava kirliliği felaketleri

Su, parçacık madde ve sülfür dioksit, smog oluşumu için gereklidir; Tüm bu faktörler birleştiğinde, tek tek olduğundan daha ciddi sonuçlara yol açmaktadır. Su buharı parçacıkların üzerinde yoğunlaşır, bu da sülfür dioksitin sülfür trioksite dönüşmesi için geniş bir hızlandırma yüzeyi sağlar. Sülfürik asit küçük su damlacıklarının içinde oluşur.

Sülfür dioksitin en yüksek seviyeleri, kömürün yoğun olarak kullanıldığı yerlerde tespit edilmiştir.

### 2.5.8 Kurşun

Atmosferdeki kurşunun temel kaynağı petrolün yakılmasıdır. Kurşunsuz benzinin yaygınlaşmasından sonra atmosferdeki kurşun seviyesi Avrupa'nın bir çok yerinde ciddi bir şekilde azaldı ve bir çok yerde artık ölçüm yapılması gerekmeyecek boyutlara indi.

Çizelge 2.2 İngiltere için belli başlı kirleticilerin 1989 değerleri, 10<sup>3</sup> ton birim alınmıştır

| Kaynak                         | Kara Duman | Sülfür dioksit | Nitrojen oksitler | Karbon monoksit | Hareketli organik bileşenler (metan hariç) |
|--------------------------------|------------|----------------|-------------------|-----------------|--------------------------------------------|
| Evsel kullanım                 | 191        | 138            | 68                | 339             | 50                                         |
| Endüstriyel                    | 81         | 683            | 353               | 331             | 1435                                       |
| Enerji istasyonları            | 25         | 2640           | 769               | 47              | 12                                         |
| Rafineriler                    | 2          | 109            | 35                | 1               | 107                                        |
| Taşıtlar:                      |            |                |                   |                 |                                            |
| Petrol                         | 15         | 22             | 848               | 6182            | 727                                        |
| Dizel                          | 182        | 38             | 580               | 160             | 160                                        |
| Demiryolu                      | -          | 3              | 32                | 12              | 8                                          |
| Gaz kaçağı (dağıtım sırasında) | -          | -              | -                 | -               | 34                                         |
| Diğer                          | 4          | 88             | 157               | 31              | 18                                         |
| Toplam                         | 500        | 3721           | 2842              | 7103            | 2551                                       |

Çizelge 2.3 Atmosfere yayılan temel gazlar ve kaynakları

| Madde             | Kirlilik kaynağı                     | Doğal kaynaklar                 | Atmosferde kaldığı süre |
|-------------------|--------------------------------------|---------------------------------|-------------------------|
| Karbon dioksit    | yanma                                | biyolojik çürüme                | 4 yıl                   |
| Karbon monoksit   | taşıma<br>yanma                      | Orman yangınları                | 1-4 ay                  |
| Hidrokarbonlar    | taşıma<br>yanma                      | biyolojik süreçler              | 16 yıl                  |
| Halojenokarbonlar | aerosoller<br>soğutucu gazlar        | -                               | 20 yıldan fazla         |
| Sülfür dioksit    | fosil kaynaklı<br>yakıtların yanması | volkanlar                       | 3-7 gün                 |
| Hidrojen sulfid   | kimya endüstrisi                     | volkanlar<br>biyolojik süreçler | 2 gün                   |
| Nitrojen oksitler | yanma                                | biyolojik süreçler              | 4 gün                   |
| Amonyak           | atık işleme                          | biyolojik çürüme                | 2 gün                   |
| Parçacık          | yanma                                | toz                             | değişken                |

## 2.5.9 Dünya Sağlık Örgütü (WHO) Tarafından Havadaki Kirleticilerin Sınıflandırılması

Havadaki kirleticiler; atmosferde normal yoğunluklarından daha fazla bulunan asılı parçacık maddeler, gazlar ve buharlar olarak sınıflandırılmıştır.

- Parçacık maddeler diğer tüm kirleticilerden daha fazla sayıda insanı etkilerler.
- Havadaki asılı parçacık maddelerin temel bileşenleri; toprak veya mineral külleri ile odun dumanı veya motor egzozlarından gelen küçük parçacıklardır.
- Gaz halindeki hava kirleticiler temel olarak nitrojen oksitler ( $\text{NO}_x$ ), ozon ( $\text{O}_3$ ), karbon monoksit ( $\text{CO}$ ), sülfür dioksit ( $\text{SO}_2$ ), amonyak ( $\text{NH}_3$ ) ve hareketli organik bileşenlerdir.
- Diğer hava kirleticiler içinde kloroflorokarbonlar (CFCs) ve diğer "sera etkisi" gazları, kurşun ve diğer ağır metaller ile radon mevcuttur.

### 2.5.9.1 Yönelimler

Gelişmiş ülkelerde, sülfür dioksit ve asılı parçacık madde yoğunlukları düşmekteyken,  $\text{NO}_x$  ve ozon seviyeleri ya sabittir ya da yükselmektedir. Gelişmekte olan ülkelerde, artmakta olan trafik ve egzoz ile endüstriyel salımlar  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_x$  ve  $\text{O}_3$  ile asılı parçacık madde yoğunluklarını artırmaktadır.

### 2.5.9.2 Hava Kirliliği

Uygun şekilde control edilmediğinde endüstri, önemli bir hava kirliliği kaynağıdır. Bu haliyle endüstriyel çalışmalar, çalışanların sağlıklarını, genel olarak çevreyi ve komşu (bazen oldukça uzaktakilerin bile) nüfusların sağlığını etkileyebilir.

- Sağlık üzerine ciddi etkileri olan belirli endüstriler şunlardır: kimya, kağıt ve kağıt hamuru, çimento, cam ve seramik, demir ve çelik, demir harici metaller, deri, petrolün işlenmesi ve rafine edilmesi ile temel olarak kömür ve petrol ile çalışan elektrik enerjisi üreten istasyonlar.
- Motorlu taşıtlar gelişmiş ülkelerdeki şehirlerde mevcut salınımlar içinde nitrojen oksitlerin % 30'u, hidrokarbonların % 50'si, kurşunun % 60'ı ve karbon monoksitin % 60'ından sorumludur. Şehir merkezlerinde bu değerler karbon monoksit için % 95 ve nitrojen oksitler için de % 70'e kadar çıkmaktadır.

Aşağıda Çizelge 2.4'de Dünya Sağlık Örgütü tarafından açıklanan rehber değerlere bazı örnekler verilmiştir. Rehber değerler ilgili madde için insan sağlığına zararlı bir etkisinin olmayacağı miktar olarak belirtilmiştir.

Çizelge 2.4 WHO Belirli kirleticiler için rehber değerler (1999)

| Kirletici             | Havadaki yıllık ortalama yoğunluğu ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) | Rehber değeri ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) | Sağlık üzerine etkilerinin görülmeye başlayacağı yoğunluk ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) | Maruz kalma süresi |
|-----------------------|-----------------------------------------------------------------|--------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|--------------------|
| <b>CO</b>             | 500-7000                                                        | 100 000                                    | Mevcut değil                                                                           | 15 dakika          |
|                       |                                                                 | 60 000                                     |                                                                                        | 30 dakika          |
|                       |                                                                 | 30 000                                     |                                                                                        | 1 saat             |
|                       |                                                                 | 10 000                                     |                                                                                        | 8 saat             |
| <b>Kurşun</b>         | 0.01-2.0                                                        | 0.5                                        | Mevcut değil                                                                           | 1 yıl              |
| <b>NO<sub>2</sub></b> | 10-150                                                          | 200                                        | 365-565                                                                                | 1 saat             |
|                       |                                                                 | 40                                         |                                                                                        | 1 yıl              |
| <b>O<sub>3</sub></b>  | 10-100                                                          | 120                                        | Mevcut değil                                                                           | 8 saat             |
| <b>SO<sub>2</sub></b> | 5-400                                                           | 500                                        | 1000                                                                                   | 10 dakika          |
|                       |                                                                 | 125                                        | 250                                                                                    | 24 saat            |
|                       |                                                                 | 50                                         | 100                                                                                    | 1 yıl              |

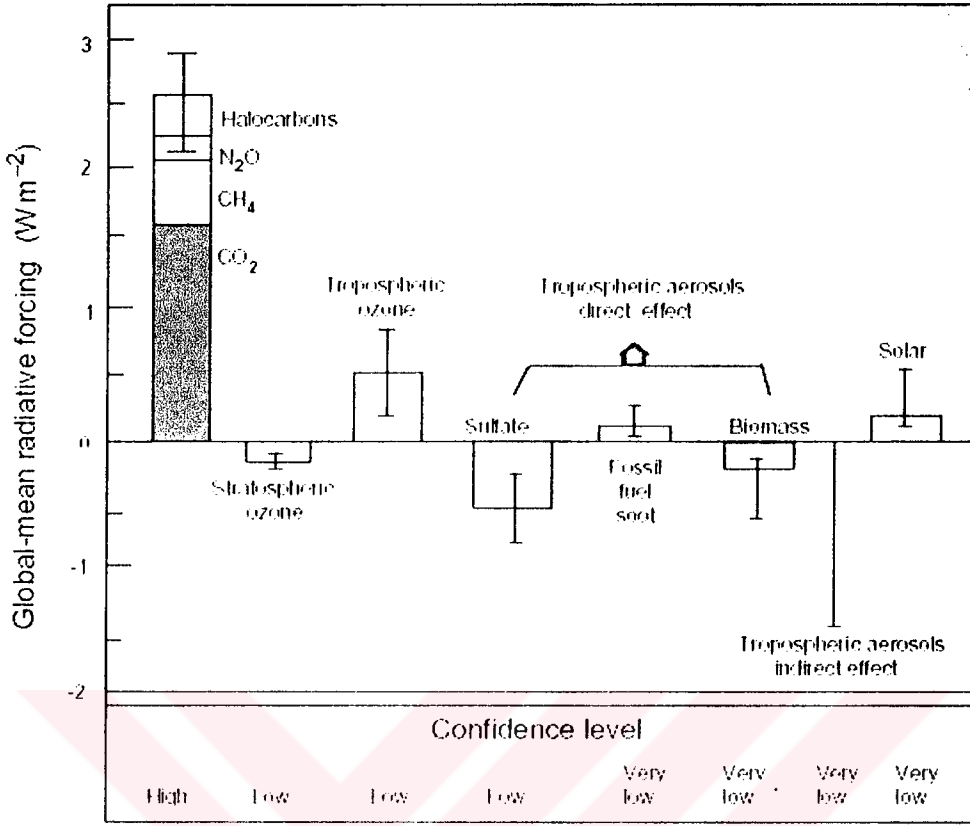
## 2.6 Atmosferdeki Aerosollar

Atmosferde katı, sıvı ve gaz halde aerosollar mevcuttur. Bunların karakteristikleri ve dağılımları yükseklikle birlikte geçici olarak oldukça değişkenlik göstermektedir. Aerosollar, yoğun hava karışımları, bulutlar ve hidrometeor oluşumunda, ayrıca meteoroloji ve atmosfer kimyasında, çekirdek olarak görev alırlar, ve atmosferin yayılım dengesinde önemli bir etkileri vardır. Bu bakımdan parçacıklarla ilgili temel mekanizmaları incelemek ve atmosferdeki aerosollarla ilgili değişimleri izlemek önemlidir. Aerosolların değişik özellikleri uydularla, hava-temelli çeşitli ölçüm aletleriyle, yer-temelli çeşitli ölçüm aletleriyle ve laboratuvarında analitik özelliklerinin belirlenmesi suretiyle ölçülebilir. Yer-temelli ölçüm cihazları belirli yerlerdeki aerosolların fiziksel ve kimyasal özelliklerini ölçerler ve uzun süreler için kullanılabilirler.

Aerosollar dünya atmosferinin doğal elemanlarından ve kaynakları genellikle doğaldır ancak, gün geçtikçe insan kaynaklı katkıların miktarı artmaktadır. 1968'de doğal kaynaklı aerosolların toplam kütlelerinin insan kaynaklı olanların kütlelerinin 8 katı olduğu hesaplanmıştı. Bir aerosol, atmosferdeki hava gibi taşıyıcı bir gaz içindeki asılı bulunan sıvı veya katı haldeki durağan parçacıklar olarak tanımlanır. Bu nedenle; toz, ince duman, duman, smog, sis, pus ve bulutlar belirli aerosol tipleri olarak düşünülebilirler. Atmosferdeki bulutlar super-doymuş hava kütleleridir ve mikroskopik nesneler olan hidrometeorlar (örneğin; aerosol parçacıkları, bulut damlaları, buz ve kar kristalleri) ile makroskopik nesneler (örneğin; kar taneleri, yağmur damlaları, dolu taneleri) içerirler. Tek tek parçacıkların büyüklüğü, yarıçap olarak 0.001  $\mu\text{m}$  ile bir kaç yüz mikrometre hatta dolu taneleri halinde santimetreler aralığında değişebilir. İlk sınıflandırma parçacık büyüklüğüne bağlı olarak yapılabilir. Yarıçapları 0.1  $\mu\text{m}$  altında olan parçacıklar "Aitken parçacıkları" olarak adlandırılır, 0.1–1  $\mu\text{m}$  aralığında olanlar "büyük parçacıklar", ve 1  $\mu\text{m}$  ve daha büyük olanlar da "dev" parçacıklar olarak adlandırılırlar. Aerosollar ayrıca kökenlerine göre deniz kökenli, kara kökenli, kırsal alan, şehirsal, dışarıdan gelmiş, ortamın normal içeriği gibi sınıflandırılabilir ve her kategori kimyasal oluşum, büyüklük dağılımı şekiller ve

benzeri farklı özelliklere sahiptir. Aitken parçacıkları, atmosferdeki en küçük parçacıklar, gazdan parçacığa dönüşüm (GPC) denilen bir işlem sonrasında doğal olarak super doymuş buharlar tarafından üretilir, genellikle gaz fazlı maddeler arasındaki fotokimyasal reaksiyonlarla ilgilidirler. Yanma ve endüstriyel işlemler gibi insan kaynaklı aktiviteler, giderek daha fazla aerosol parçacıkları veya bunların oluşumunda bir ön adım olan gazların atmosfere salınmasına sebep olmaktadır. Büyük aerosol parçacıkları, yanma ve diğer insan kaynaklı işlemler sonrasında ve doğal süreçler sonrasında (örneğin; daha küçük Aitken parçacıklarının sıvı halden katı hale geçmesiyle) meydana gelirler. Dev parçacıkların oluşumunda söz konusu olan doğal kaynaklar, deniz tuzundan aerosol oluşumu, çöl kumunun hareketlilik kazanması ile endüstriyel kaynaklı salınımlar, madencilik, organik kütleler ve odun yakılması, tarımsal kökenli toz gibi insan kaynaklı öbekten parçacığa dönüşüm (BPC) sürecidir.

Atmosferik aerosol hacim dağılımını parçacık büyüklüğüne bağlı olarak gösteren grafikler 3 farklı tepe noktası (mod) içerebilir. Bu tepe noktaları, “çekirdek mod”, “birikme mod” ve “düzensiz şekilli mod” olarak adlandırılabilir. Çekirdek modu, gazların ve buharların yoğunlaşmasında oluşan birincil parçacıkları içerir. Bu küçük parçacıkların sıvı halden katı hale geçmesi, GPC ve buharların mevcut küçük parçacıklar üzerinde yoğunlaşması birikme modunu oluşturur, ve düzensiz şekilli modda toplanan parçacıklar çoğunlukla BPC sonucunda üretilirler. Bu modlardaki tipik parçacık büyüklükleri yarıçap olarak; çekirdek modu için  $0.02 \mu\text{m}$ , birikme modu için  $0.2 \mu\text{m}$  ve düzensiz şekilli mod için  $5 \mu\text{m}$ 'dir. Bu büyüklükler örnekleme süresine, yerine ve örneklenen gaza bağlı olarak değişir ve bir örneğin içinde tüm modların bulunması da şart değildir. Bu “üç-mod yaklaşımı” teorik ve deneysel çalışmalar için faydalı olmakla birlikte, gerçek atmosferik ölçümler oldukça farklı özellikler sergileyebileceği için yine de kavramsal bir model olarak düşünülmelidir.



Şekil 2.7 Çeşitli gazların ve aerosolların dünya çapında yayılım kuvvetleri (1850–1990). Aerosolların atmosfer üzerindeki doğrudan ve dolaylı etkileri dikkate alınmıştır. Belirsizlikler hata çubukları olarak belirtilmiştir ve güvenilirlik seviyeleri de verilmiştir. (IPCC'nin izniyle yeniden üretilmiştir (1996))

Aerosol ölçme metodları fiziksel ya da kimyasal prensiplerin uygulanması ile olur. Verilmiş büyüklükteki parçacıkların havadaki sayı yoğunluğunun belirlenmesi fiziksel teknikler kullanılarak belirlenebilir. Parçacıkların termodinamik fazı, toplam kütle yoğunluğu, toplam parçacık yüzey alanı, toplam hacim ve çeşitli optik özellikler de ölçülebilir. Diğer taraftan, parçacık karışımını, yoğunluğu, ve tepkimeye girme durumunu belirlemek için değişik kimyasal analiz yöntemleri geliştirilmiştir. Her bir aerosol parçacığının şekli oldukça karmaşık ve yüksek değişkenlikli olabileceği için, büyüklüğe bağlı parametrelerin analizi için eşdeğer bir parçacık yarıçapına ihtiyaç

vardır. Bunun için, incelenmekte olan küresel olmayan ama aynı özelliklere (hacim, optik saçılma için kesit gibi) sahip parçacığın küresel yarıçapı alınır.

Atmosferdeki parçacıkların büyüklüğü genliğin beş katına kadar (hatta yağmur damlaları, kar taneleri gibi kararlı olmayan parçacıklar için yedi kat) çeşitlilik gösterebildiği için, ilgilenilen aerosole ait özelliklerin belirlenebilmesi için değişik teknikler hatta değişik fiziksel prensipler uyarlanmalıdır. Bu sadece bir alet kullanılarak gerçekleştirilemez. Örneğin, küçük parçacıklar mekanik ve elektriksel mobiliteleri belirlenerek ölçülebilir, 0.3  $\mu\text{m}$  ile kabaca 100  $\mu\text{m}$  aralığındaki parçacıklar için optik yöntemler kullanılabilir. Yaklaşık olarak 0.1  $\mu\text{m}$ 'nin üzerindeki parçacıkların örneklenmesi ve ilgili kimyasal analizleri de yapabilme seçeneğine de sahip olmak için, parçacıkların yüzeylere çarptırılmasına dayanan teknik uygundur. Parçacık örneklerinin fiziksel ve kimyasal özelliklerinin belirlenmesi için electron microscopy, X-ray fluorescence (XRF), atomic absorption spectrometry (AA), emission spectrometry (ES), infrared (IR) spectroscopy, anodic stripping voltammetry (ASV), electron spectroscopy for chemical analysis (ESCA), ion chromatography, laser microprobe mass spectrometry (LMMS), proton (or particle)-induced X-ray emission (PIXE), neutron activation (NA), ve daha başka bazı metodlar kullanılmaktadır.

Aerosolların düşey düzlemdeki dağılımlarının fiziksel ve kimyasal analizlerinin yapılması, doğal ve insan kaynaklı olarak çevrenin tehdit edilmesi üzerindeki aerosol ve bulut etkilerinin incelenmesinde temel çalışmalardır.

Aerosol ve bulutlarla ilgili araştırmalar için, yapılan araştırmada elde edilmek istenen sonuçların niteliğine göre platform tipinin ve enstrümanların doğru seçilmesi gereken havasal platformlar (uçaklar ve balonlar) yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Atmosferin uçak ve balonlar tarafından erişilebilir kısımları değişik katmanlardan oluşmuştur; Gezegensel Sınır Katmanı (Planetary Boundary Layer (PBL), zeminden

yaklaşık 1–2 km yüksekliğe kadar), serbest troposfer (Sınır katmanının üst kısmından yerel tropopause'ye kadar), ve stratosfer.

Atmosferdeki aerosolların karakteristikleri ve dağılımları yüksek bir değişkenliğe sahiptir; bulunulan yere, yüksekliğe bağlı olarak ve geçici başka sebeplerden dolayı değişkenlik gösterebilmektedir. Troposferin alt katmanlarındaki aerosol genel olarak düzgün olmayan bir şekilde dağılmıştır, kaynaklar (çöller gibi) civarında ve patlama olayları sırasında büyük aerosol yoğunlukları tespit edilebilir. Ölçülen parçacık büyüklükleri çekirdek, birikme ve düzgün olmayan şekil modlarını içerebilir, bununla birlikte, çoğu zaman bu modların hepsi aynı anda gözlenmemektedir parçacık büyüklük dağılımı ölçümlerinde. Matematiksel olarak bu dağılımlar bir log–normal fonksiyonu tarafından tanımlanmaktadır, ve atmosferdeki aerosolların karakterize edilmesinde yoğunlukla bu tür çok modlu dağılımlar kullanılmaktadır. Parçacık sayısı yoğunluğu, artan parçacık büyüklüğü ile birlikte azalmaktadır ve Aitken parçacıkları bir hava örneğindeki toplam parçacık sayısı içinde baskın olmaktadır. Diğer taraftan, toplam hacim içindeki katkıları küçüktür ve en büyük katkı büyük ve dev parçacıklar tarafından yapılır.

Büyüklükleri bir kaç nanometreyle bir kaç on mikrometre arasında değişen parçacıklar için tipik sayı yoğunlukları kabaca tanımlanabilir, örneğin zemin (kıtasal) seviyesinde toplam yoğunluklar  $1.4 * 10^4 \text{ cm}^{-3}$  parçacık civarındadır ve uzaklaştıkça  $6 * 10^2 \text{ cm}^{-3}$  değerine doğru azalır. Büyük şehirlerde toplam yoğunluk  $10^5 \text{ cm}^{-3}$  parçacık seviyesindeyken, küçük kasabalarda  $3 * 10^4 \text{ cm}^{-3}$  değeri gözlenir ve okyanuslar üzerinde, kıyıda oldukça açıkta,  $5 * 10^2 \text{ cm}^{-3}$  değeri bulunabilir. Temiz Arktik ortamındaki ölçümler toplam parçacık yoğunluğunu yaklaşık  $50 \text{ cm}^{-3}$  olarak göstermektedir, Antarktik kıtası açığındaki bundan da düşüktür. Atmosferik hava yoğunluk profile ile birlikte, parçacık sayısı yoğunluğu (bir santimetreküp havadaki parçacık sayısı) atmosferin en alttaki 6 km içinde üstel olarak azalır. Bu seviyenin üzerinde ortamda gözlenen troposferik aerosol  $\text{cm}^3$  başına 200–300 Aitken modunda parçacık civarındadır. Tropopause üzerinde toplam sayı yoğunluğu tekrar  $1\text{--}10 \text{ cm}^{-3}$  parçacık minimum seviyesine düşer ve 30 km yüksekliğe kadar sabit kalır.

Büyük parçacıklar olması durumunda (0.1–1.0  $\mu\text{m}$  arası büyüklüklerde) toplam yoğunluk yükseklikle birlikte üst troposferde minimum  $\text{cm}^3$  başına 0.01–0.02 parçacık seviyesine düşer. Stratosferde değerler artar ve  $\text{cm}^3$  başına 0.1–1 parçacık ile maksimuma ulaşır 17 km (kutuplarda) ile 25 km (ekvator bölgesinde) yükseklikleri arasında coğrafi enleme bağlı olmak üzere. Bu maksimum yoğunlukların üzerinde yoğunluklar tekrar düşer. Sülfürik asit damlalarının bu stratosferik aerosol katmanına Junge katmanı denir ve maksimumunun yükseklik değeri enleme göre değişir.

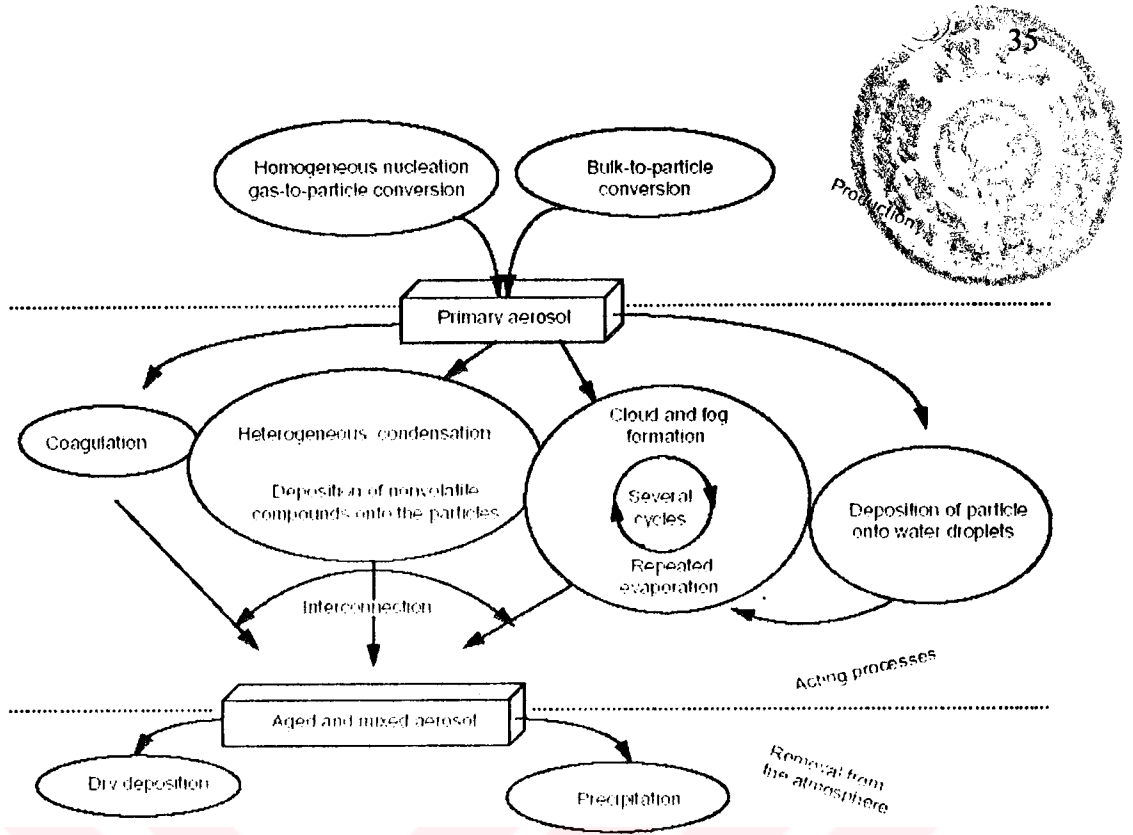
Aerosollar ince duman, sis, bulut ve hidrometeor oluşumunda temel bir rol oynarlar. Eğer parçacıklar katıysa, gazların üzerinde kimyasal tepkimeye girecekleri bir zemin oluştururlar. Eğer sıvıysa, gazları absorbe ederler ve gazlar damlaların içinde tepkimeye girerler, ve böylece yeni bileşikler ortaya çıkar ve atmosfere salınır. Bu kimyasal rol özellikle kirli hava koşullarında hem aşağı troposferde hem de stratosferde çok önemlidir, örneğin, stratosferik ozon kimyası ve troposferdeki asit yağmuru olgusu için. Bunun da ötesinde bulut ve aerosollar atmosferin yayılım dengesinde önemli bir etkiye sahiptir.

Atmosferik aerosollar ve bulutlar yakından ilgilidir, çünkü, troposferik bulutlardaki her yağmur damlası, buz kristali ve yağış elemanı önceden mevcut bir aerosol parçacığının üzerinde oluşur. Atmosferdeki su buharı ile doyma seviyeleri hiç bir zaman homojen homomoleküler çekirdeklemeye, örneğin su buharından doğrudan sıvı su damlaları oluşumu, izin verecek seviyede yüksek değildir. Bulut damlaları her zaman mevcut aerosol parçacıkları üzerinde heterojen çekirdeklenme yoluyla oluşur. Eğer dünya atmosferinde aerosol parçacıkları olmasaydı, bulutlar ve yağış oluşamazdı. (İstisna olarak, homojen hetero-moleküler yoğunlaşma atmosferde mümkündür, örneğin stratosferde sülfürik asit ve su buharının birlikte yoğunlaşması.) Bulutlar gezegenin iklimini etkilerler, ve kimyasal olarak bulut damlaları havanın kimyasal yapısını etkileyen küçük reaktörler olarak davranırlar. Bulutların dağılımı, optik özellikleri, ve bunlarla ilgili kimya, iklim değişimlerini anlayabilmek için birinci öncelikle anlaşılması gereken konulardır.

## 2.7 Troposferik Aerosollar

### 2.7.1 Gezegenel Sınır Katmanı (PBL)

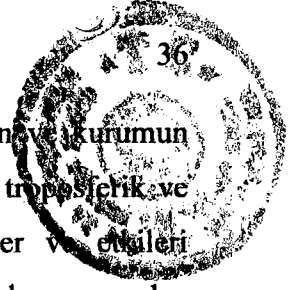
Troposferik aerosolların en büyük kısmı PBL içindedir, burası aynı zamanda dünya yüzeyi ile atmosfer arasındaki en büyük enerji değişiminin gerçekleştiği yerdir. Aynı zamanda aerosolları oluşturan BPC ve antropojenik süreçlerin de büyük bir kısmı burada meydana gelir. Global olarak aerosol üretimi miktarının 2000 Tg/yıl olduğu tahmin edilmektedir, bunun % 15'i antropojenik kaynaklıdır. Bu % 15'lik kısmın beşte birinin doğrudan antropojenik kaynaklı salınımlardan geldiğine inanılmaktadır, sulfuric asit ve suyun birlikte yoğunlaşması GPC'den gelen antropojenik katkının % 80'inin oluşturmaktadır. Yerleşim yerlerindeki aerosollar doğal olarak antropojeniktir ve fosil kaynaklı yakıtların yanmasından, endüstriyel ve kimyasal üretimlerden olduğu gibi GPC ve BPC'den kaynaklanır. Örneğin fotokimyasal ve sülfür kaynaklı smog, tipik olarak insanların şehirlerdeki aktiviteleri ile ilgilidir. Yerin çok yakınında havadaki aerosol içeriği nadiren  $\text{cm}^3$  hava başına 1 mg parçacık maddeden daha azdır. Şehirlerde  $\text{m}^3$  başına 100 mg değerleri ölçülmüştür, ve kum fırtınalarında aerosol miktarı  $\text{m}^3$  başına 30000 mg olabilir. Genel olarak, ölçülen aerosol kütle yoğunluğu atmosferdeki diğer nadir gazların yoğunluğu ile karşılaştırılırsa, aerosolların katkısının nadir gazların ppbv (parts per billion by volume) aralığında olduğu görülür.



Şekil 2.8 Atmosferdeki parçacık oluşumu içeren aerosollarla ilgili süreçler

### 2.7.2 Serbest Troposfer

Serbest troposfer, PBL'den daha az aerosol içerir. Atmosferdeki su buharının en büyük kısmı troposferdedir ve serbest troposfer de bulutların bulunduğu ve meteorolojik olayların çoğunun gerçekleştiği yerdir. Çöllük alanlardaki kum fırtınaları toz bulutları yaratır ve mikometreden küçük ölçekli parçacıklara (silikatlar) hareketlilik kazandırır, daha sonra bunlar bir kaç bin kilometre mesafe katederek



serbest troposfere taşınır. Benzer olarak orman yangınları da duman ve kurumun uzun mesafelere taşınmasına sebep olur. Uçakların egzoz çıktıları da troposferik ve alt stratosferik aerosolların kaynağıdır, yoğunluklar, karakteristikler ve etkileri hakkında çok fazla bilgi yoktur ve önemli araştırma konularıdır. Uçak egzozundan çıkan su buharı da üst troposferdeki yoğunluğu ve ilave sirtus bulutlarının oluşumunu etkiler.

Yeni oluşmuş aerosol için alt troposferde kalma süresi, sıvıdan katı hale geçiş, çökelme, kuru arındırma, bulut damlalarına karışma, yağış sayesinde arındırma (ıslak arındırma) gibi aerosolları yok eden süreçler nedeniyle bir kaç gün mertebesindedir. Üst troposferde kalma süresi 1–2 hafta olabilir. Şekil 2.8’de aerosol üretimi, trposferde aerosolların maruz kaldığı değişiklikler ve bunların yok edilmeleri gösterilmiştir.

## 2.8 Stratosferik Aerosollar

Troposferdeki aerosollar ve bulutlar oldukça değişik parçacık tiplerine sahipken, stratosferdeki durum daha az karışıktır. Stratosferdeki aerosollar, stratosferik sülfat aerosolları (SSA) ve kutupsal stratosferik bulutlar (PSC) olarak sınıflandırılabilir, PSC’ler Tip I ve Tip II olarak ikiye ayrılır. İlâveten, uçaklardan stratosphere kurum parçacıklarının karıştırılması da bir rol oynayabilir. SSA’lar ikili sıvı  $H_2SO_4$  çözeltisi ve sudan oluşur, ve bunlar tropopause’dan 30 km’ye kadar her yükseklikte bulunur. Bu yüksekliğin üzerinde stratosferik sıcaklıklar çok yüksektir ve  $H_2SO_4$  kısmi basıncı çok düşüktür, öyle ki damlalar buharlaşır. Stratosferin ağır volkanik aerosol girişleriyle doldurulmadığı dönemlerde dağılım görelî olarak tüm enlemlerde benzerdir ve yoğunluk  $cm^{-3}$  başına 10 parçacık mertebesindedir.

PSClerin Tip I olanları sıvı çözelti nitrik asit veya katı ya da hidrat fazındaki halinden oluşur. Bu parçacıklar yarıçap olarak 0.5–2 mm mertebesindeirler. PSClerin alt gubu olan “Tip Ia”nın nitrik asit trihidrat parçacıklarından (NAT;  $\text{HNO}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ ) oluştuğuna inanılır. İkinci alt katgorideki bulutlar için “Tip Ib”, genellikle  $\text{H}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{HNO}$  ve  $\text{O}$ ’nun süper-soğuk üç parçalı çözeltilerinden (STS) ve bunların içinde eser miktarda  $\text{HCl}$ ,  $\text{HOCl}$ , ve muhtemelen biraz bromine içeren bileşiklerden oluştuğu kabul edilir. Tip II kategorisindeki PSCler muhtemelen biraz  $\text{HNO}_3$  and  $\text{H}_2\text{SO}_4$  içeren buz kristallerinden oluşur. Bu parçacıklar belirli bir şekilde daha büyüktürler ve çapları 4 ile 40 mm arasında değişir. Sülfürik asit tetrahidrat (SAT), nitrik asit monohidrat veya nitrik asit dihidrat (NAM,NAD) gibi diğer hidratlar da olabilir çünkü bunlar stratosferik koşullarda termodinamik olarak dengededir.



### 3 LASER IŞIĞININ ATMOSFERDE İLETİMİ

Atmosferin laser yayınımlı açısından saydam olması, atmosferdeki gazlar ve parçacıklarla ilgili izleme çalışmaları sonucunda sayısal sonuçlar elde etmemize yarayan eşitliklerdeki en önemli parametrelerden birisidir. Laser ışınının atmosferde yayılması sırasında karşılaştığı enerji kaybı kural olarak, aynı anda gerçekleşen şu fiziksel olaylarının neticesinde olur: moleküler soğurma; moleküler saçılma; parçacık saçılması.

#### 3.1 Moleküler Soğurma

##### 3.1.1 Temel Tanımlar

**Zayıflama Katsayısı.** Bir ortamın zayıflama katsayısı  $\alpha(\nu)$  dalga sayısı  $\nu$ 'nın yayılması için Beer yasasında (ya da Beer-Lambert yasası) bir orantı faktörüdür ve ortamın transmisyon özelliklerini karakterize eder. Birim olarak genellikle  $\text{cm}^{-1}$  (doğrusal zayıflama katsayısı), veya  $\text{cm}^2/\text{cm}^3$  (hacimsel yokolma katsayısı) kullanılır; ilk terminoloji iletim ile ilgili çalışmalarda tercih edilir, diğeri de atmosferdeki belli bir hacmin uzaktan incelenmesi amaçlı çalışmalarda kullanılır. Diferansiyel formda yazıldığında Beer yasası  $z$  doğrultusunda hareket eden düzlemsel bir dalga için aşağıdaki hale gelir,

$$dI(\nu) = -I(\nu)\alpha(\nu, z)dz \quad (3.1.);$$

burada  $dI(\nu)$  derinliği  $dz$  olan ortamdan geçtikten sonra ışının yoğunluğundaki değişimdir. (3.1) ifadesinin  $L$  tabaka derinliği üzerinde,  $Z_1$  ve  $Z_2$  mesafeleri arasında integre edilmesinden tek taraflı bir yol için aşağıdaki ifade elde edilir,

$$I(\nu) = I_0(\nu) \exp\left[-\int_{Z_1}^{Z_2} \alpha(\nu, z)dz\right] \quad (3.2.);$$

ortamın homojen olması durumunda, üstel zayıflama yasasının aşağıdaki basit formunu alır

$$I(\nu) = I_0(\nu) \exp[-\alpha(\nu)L]. \quad (3.3.);$$

(3.2) ve (3.3)'teki  $I_0(\nu)$ , başlangıç radyasyon yoğunluğudur [ $W/cm^2$ ], üstel kısımdaki  $\alpha(\nu)L$  de ortamın optik kalınlığı  $\tau(\nu)$  olarak adlandırılır ve boyutsuzdur.

**Spektral Soğurma ve Spektral Transmisyon.** Aşağıdaki eşitlikler spektral soğurma  $A(\nu)$  ve spektral transmisyonu  $T(\nu)$  tanımlar:

$$\begin{aligned} A(\nu) &= [I_0(\nu) - I(\nu)]/I_0(\nu) \\ T(\nu) &= I(\nu)/I_0(\nu) \end{aligned} \quad (3.4.);$$

bu eşitlikler, monokromatik bir radyasyonun belirli bir ortamda soğurulması veya ortamdan geçişi durumunda zayıflamanın sadece soğurma ile olması halinde oluşan kırılmayı karakterize eder.

**Soğurma Fonksiyonu ve Transmisyon Fonksiyonu:** Soğurma fonksiyonu  $A$ , monokromatik olmayan soğurmanın bir kısmının verilen spectral aralıkta  $\Delta(\nu) = \nu_2 - \nu_1$  ortam tarafından absorbe edildiğini gösterir. Transmisyon fonksiyonu  $T$  da benzer şekilde ifade edilir.

$$A = \int_{\nu_1}^{\nu_2} I_0(\nu) A(\nu) d\nu / \int_{\nu_1}^{\nu_2} I_0(\nu) d\nu \quad (3.5.);$$

$$T = \int_{\nu_1}^{\nu_2} I_0(\nu) T(\nu) d\nu / \int_{\nu_1}^{\nu_2} I_0(\nu) d\nu \quad (3.6.);$$

(3.5) ve (3.6)'de görüldüğü gibi, soğurma ve transmisyon fonksiyonları spectral aralıkda  $[\nu_1, \nu_2]$  spektral soğurma ve transmisyonun ortalama değerlerini verirler.

Eğer  $N(z)$   $z$  lokasyonunda absorbe edilen moleküllerin sayısının yoğunluğu ise  $[\text{cm}^{-3}]$  ve  $\sigma(\nu, z)$ ,  $\nu$  dalga sayısında molekül başına soğurma kesit alanı  $[\text{cm}^2]$  ise, zayıflama katsayısı  $\alpha(\nu, z) = N(z) \sigma(\nu, z)$  haline gelir. Bu durumda;

$$A = \int_{\nu_1}^{\nu_2} I_0(\nu) \left\{ 1 - \exp \left[ - \int_{z_1}^{z_2} N(z) \sigma(\nu, z) dz \right] \right\} d\nu / \int_{\nu_1}^{\nu_2} I_0(\nu) d\nu \quad (3.7.);$$

$$T = \frac{\int_{\nu_1}^{\nu_2} I_0(\nu) \exp\left[-\int_{z_1}^{z_2} N(z) \sigma(\nu, z) dz\right] d\nu}{\int_{\nu_1}^{\nu_2} I_0(\nu) d\nu} \quad (3.8.);$$

(3.7) ve (3.8) eşitlikleri, soğurma ve transmisyon fonksiyonlarını, homojen olmayan bir absorbe edici ortamda  $[\nu_1, \nu_2]$  spectral aralığında bu aralık içindeki herhangi bir radyasyon yoğunluk kaynağı için radyasyon yayılımını genel durumda ifade eder.

Yukarıdaki ifadelerden görüldüğü gibi, homojen bir atmosferde monokromatik radyasyondaki moleküler soğurma kaynaklı enerji kayıplarının miktarının belirlenmesi için, ilgili yayılım frekansı için soğurma kesit alanını, yoğunluk ya da absorbe eden moleküllerin ortamdaki konsantrasyonunu ve ortamın geometrik derinliğini bilmek zorunludur.

### 3.1.2 Ayırık Bir Hat Tarafından Soğurma

Laser radyasyonunun atmosferdeki gazlar tarafından soğurulması üzerinde fikir yürütürken, çoğu durumda bir gazın veya bir başka gazın ayırık hatları tarafından soğurma ile karşılaşılır. Her bir soğurma hattı şu üç parametre tarafından karakterize edilir: pozisyon, genişlik, yoğunluk. Ayrıca, her bir hat belli bir şekle sahiptir.

Atmosferin alt katmanlarında, spectral hatların genişlemesi genel olarak moleküller arası çarpışmalardandır. Hatların dış kısmında bu etkiler sebebiyle görülen bozulmaya dağılma (dispersion) denir.

İki bileşenli bir gaz karışımı için formül, genellikle aşağıdaki basit formda verilir:

$$\gamma_{L.} = \gamma_{L.}^0 (p / p_0) (T_0 / T)^{1/2} \quad (3.9.);$$

burada  $p$  basınç,  $T$  de mutlak sıcaklıktır.  $\gamma_{L.}^0$  standart koşullarda hattın yarı-  
genişliğidir (genellikle,  $p_0 = 1 \text{ atm}$ ,  $T_0 = 273 \text{ K}$ ).

Atmosferdeki gazların soğurma hat yarı genişliği için mevcut hesaplamaların toplanması sonucunda, atmosferin yere yakın katmanlarında değerlerinin  $0.01 - 0.1 \text{ cm}^{-1}$  mertebesinde olduğu görülür. Eğer yükseklik nedeniyle meydana gelen sıcaklık ve basınç değişimleri biliniyorsa, ve standart koşullardaki değeri de biliniyorsa,  $\gamma_L$  değerini herhangi bir yükseklik için (3.9) kullanılarak hesaplamak zor değildir.

Spektral hat genişlemesi aynı zamanda Doppler etkisi neticesinde de olur. Moleküllerin termodinamik dengede olduğu varsayımı altında sadece Doppler etkisi kaynaklı spectral hat bozulması için aşağıdaki eşitlik elde edilebilir;

$$\sigma(\nu) = (S / \gamma_D) (\ln 2 / \pi)^{1/2} \exp[-(\nu - \nu_0)^2 \ln 2 / \gamma_D^2] \quad (3.10.);$$

burada  $S$  hat yoğunluğu, ve

$$\gamma_D = (\nu_0 / c) (2kT \ln 2 / m)^{1/2} \quad (3.11.);$$

Doppler hat yarı-genişliği,  $m$  molekülün kütlesi ve  $c$  ışık hızıdır.

Spektral bir hattın yoğunluğu, tüm frekanslar üzerinde soğurma kesit alanının integrali olarak ifade edilir:

$$S = \int_{-\infty}^{\infty} \sigma(\nu) d\nu \quad (3.12.);$$

burada  $\nu = f/c$ ,  $f$  [Hz] radyasyonun frekansı ve  $\nu$  [ $\text{cm}^{-1}$ ] de ilgili dalga-sayıdır.  $\sigma(\nu)$ ,  $\text{cm}^2$  boyutunda olduğundan,  $S$  de  $\text{cm}$  boyutundadır.

Kuantum mekaniği bir molekülün  $i$  halinden  $j$  haline ayırık geçişlerinin yoğunluğu için aşağıdaki eşitliği verir:

$$S_{ij} = (8\pi^3 \nu_{ij} / 3hc) (N_i / g_i N) |R_{ij}|^2 [1 - \exp(-h\nu_{ij} / kT)] \quad (3.13.);$$

burada  $\nu_{ij}$ , geçiş frekansı (dalga-sayı);  $N_i/N$ ,  $i$  halinde  $g_i$  istatistiksel yoğunluklu kesirli sayı yoğunluğu;  $|R_{ij}|^2$ , dipol momentinin matris elemanının karesi ve  $h$  de Planck sabitidir.

Dipol moment  $\mu$ 'nın matris elemanı, moleküler haller  $\psi_i$  ve  $\psi_j$ 'nin dalga fonksiyonları olarak ifade edilir:

$$\int \psi_i^* \mu \psi_j dV = 0 \quad (i \neq j) \quad (3.14.);$$

Eğer  $\mu$  sabitse,  $R_{ij} = 0$ 'dır; dolayısıyla, bir molekülün bir enerji seviyesinden diğerine dipol radyasyon yoluyla geçişi, dipol momentini değişken değilse söz konusu değildir.

Işığın salınması veya soğurulması aynı zamanda bir molekülün *magnetik* dipol veya elektrik *quadrupole* değişimiyle de olabilir; bununla birlikte, bu geçişlere ait hatların yoğunluğu nispeten azdır. Örneğin, bir molekülün elektrik dipol momentindeki değişimden kaynaklanan geçişler, magnetik dipol geçişlerinin sebep olduklarının 5 katı, elektrik quadrupole kaynaklı olanların da 8 katı daha yüksek hat yoğunluklarına sahiptir.

Sonuç olarak, bir molekülün atmosferdeki her soğurma hattı, kendine has merkez noktasına, genişliğe ve yoğunluğa sahiptir. Bu parametrelerin yüksek doğruluklu olarak bilinmemesi durumunda, dış hatlardaki dağılmanın doğru olarak bilinmesi halinde bile soğurma katsayısının teorik olarak bulunması söz konusu değildir.

### 3.1.3 Atmosferdeki Gazların Soğurma Spektrasının Genel Karakteri

Ultraviole, görünür ve infrared dalgalı boylarında atmosferdeki soğuran temel gazlar; su buharı, karbon dioksit, ozon ve oksijendir. Atmosferde bu dalgalı boylarındaki radyasyonu soğuran ama daha az miktarda bulunan maddeler de mevcuttur. Bunlar öncelikle karbon monoksit, metan ve nitrojen oksitlerdir.

Su buharı ve ozon asimetrik moleküllerdir; bu nedenler elektronik, titreşimsel ve döngüsel spektraları soğurma hatları bakımından oldukça zengindir.  $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ ,  $\text{NO}$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{O}_2$  ve  $\text{N}_2$  molekülleri lineerdirler ve genellikle spektral aralık başına daha az hat içerirler.

**Su Buharı:** Suyun elektronik soğurma spektrumu, uzak ultraviyole bölgesindedir (186 nm'den küçük dalga boyları). Titreşimsel-döngüsel spektrumu üç temel bant  $\nu_1$ ,  $\nu_2$  ve  $\nu_3$  içerir ve merkezleri 3657.05, 1594.78 ve 3755.92  $\text{cm}^{-1}$ 'dir; kızılötesi ve görünür bölgede üst tonlar, kombinasyonlar ve sıcak bantlar içerir.

$\text{H}_2\text{O}$  için en yoğun ve en geniş titreşim-döngü bandı, merkezi 6.3  $\mu\text{m}$  civarında bulunan  $\nu_2$  bandıdır. Bu bant 5.5 – 7.5  $\mu\text{m}$  spektral aralığındaki güneş kaynaklı radyasyonu tamamıyla soğurur.

Su molekülünün büyük dipol momentleri ve izotopları kendisine 8  $\mu\text{m}$  civarından başlayan ve birkaç santimetre mertebesine kadar olan geniş bir bölgeyi kapsayan yoğun bir döngüsel spektrum sağlar.

**Karbon Dioksit:**  $\text{CO}_2$  için elektronik soğurma spectrumu uzak ultraviyole bölgesindedir. Titreşim-döngü bantları yaklaşık olarak 0.78 and 20  $\mu\text{m}$  aralığındadır.  $\text{CO}_2$  saf bir döngüsel spektruma sahip değildir.

$\text{CO}_2$  molekülünün üç temel titreşimi  $\nu_1$ ,  $\nu_2$  and  $\nu_3$  içinde  $\nu_1$ , optik olarak aktif değildir çünkü, dipol momentleri simetriktir ve bu nedenle titreşimler sırasında sabit kalır.  $\nu_2$  ve  $\nu_3$  temel titreşim-döngü merkezleri 667.40 $\text{cm}^{-1}$  ( $\approx 15 \mu\text{m}$ ) ve 2349.16  $\text{cm}^{-1}$  ( $\approx 4.3 \mu\text{m}$ ) civarındadır.

**Ozon:**  $\text{O}_3$  molekülünün elektronik geçişleri ultraviyole bölgesinde (340 nm'den küçük dalgaboyları) Hartley ve Huggins bantları, 450-740 nm bölgesinde de Chappuis bantları üretirler.

O<sub>3</sub> için üç temel titreşim frekansı da soğurma anlamında aktiftir. Merkezleri  $\nu_1 = 1110 \text{ cm}^{-1}$  (9  $\mu\text{m}$ ),  $\nu_2 = 710 \text{ cm}^{-1}$  (14.1  $\mu\text{m}$ ) ve  $\nu_3 = 1043 \text{ cm}^{-1}$  (9.6  $\mu\text{m}$ ) olan üç temel titreşim-döngü bandı oluştururlar.

Ozonun en kuvvetli soğurma bandı 9.6  $\mu\text{m}$  merkezi civarındadır ve atmosferik saydam pencere olarak bilinen uzun-dalga'nın (8 – 13  $\mu\text{m}$ ) merkezindedir. Yaklaşık 1  $\mu\text{m}$  genişliğindeki merkez kısmı güneş kaynaklı radyasyonun neredeyse yarısını soğurur.

**Nitrous Oksit:** Lineer asimetrik molekül N<sub>2</sub>O'ye ait güçlü elektronik bantlar uzak ultraviole bölgesindedir. Üç temel titreşim frekansı:  $\nu_1 = 1285.6 \text{ cm}^{-1}$  (7.8  $\mu\text{m}$ ),  $\nu_2 = 588.8 \text{ cm}^{-1}$  (17.0  $\mu\text{m}$ ) ve  $\nu_3 = 2223.5 \text{ cm}^{-1}$  (4.5  $\mu\text{m}$ ) kızıl-ötesi bölgede aktiftir. N<sub>2</sub>O molekülü bir çok üst ton bantları, kombinasyon frekansları ve sıcak bantlara; bununla birlikte, bunların büyük bir kısmının yoğunluğu düşüktür ve güneş kaynaklı radyasyonun atmosferde soğurulması üzerinde etkileri yoktur.

N<sub>2</sub>O molekülünün saf soğurma spektrumu uzak kızıl-ötesi spektral bölgesindedir.

Yukarıdaki bilgiler ışığında şu sonuca ulaşılabilir: 0.2 ile 20  $\mu\text{m}$  dalgaboyları aralığında atmosferdeki gazların sebep olduğu soğurma esas olarak titreşim-döngü bantlarındandır ve bunların en kuvvetlisi de, kızıl-ötesi bölgededir. Açıktır ki, laser için dalgaboyunun soğurma hattının merkezine yakın olması veya soğurma bandının kuvvetli hatlarının merkezinde yer almasından bağımsız olarak, soğurmanın çok yoğun olduğu bu bölgelerde atmosferin laser kullanılarak izlenmesini mümkün olmaktan alıkoymaktadır. İkinci durum söz konusu olduğunda, soğurma katsayıları, soğurma hatlarının merkezindeki değerlerinden küçüktür ve soğurma, laserin atmosferdeki yayılımının ilk birkaç santimetresinde veya metresinde, güçlü hatların

kanatlardaki etkisi sebebiyle % 100 mertebesine ulaşabilir. Kuvvetli soğurma durumunda, laser ile izleme sadece atmosferin yüksek katmanlarında yapılabilmektedir çünkü, buralarda soğurmaya sebep olan gazların yoğunlukları çok daha düşüktür. Elbette ki, eğer izlenecek olan kirletici soğurma anlamında baskınsa ve diferansiyel soğurma tekniği kullanılacaksa, bu dalgaboyu da izleme amaçlı olarak kullanılabilir.

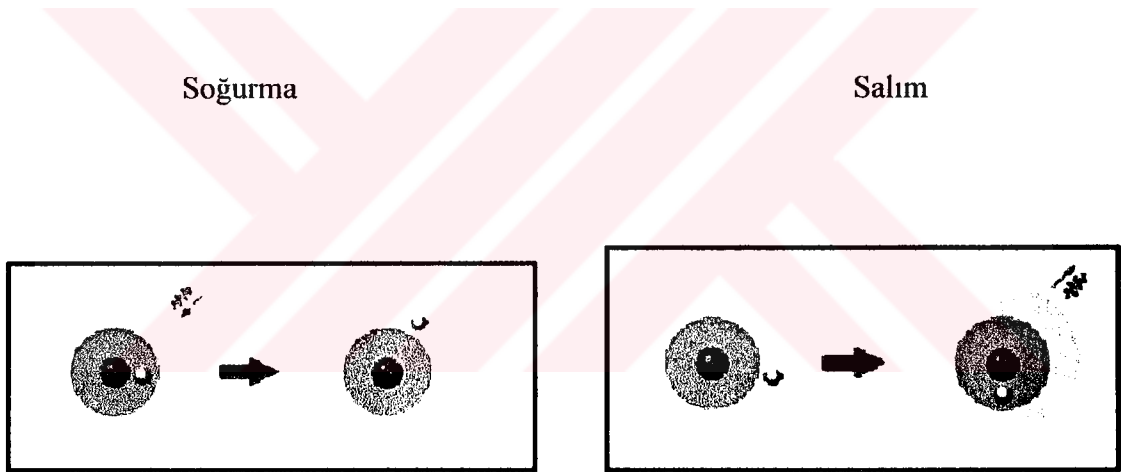


## 3.2 Spektral Hat Kavramı

### 3.2.1 Atomik Soğurma (Salım) Spektrumu

- Radyasyon salımı (soğurulması) yalnızca, bir atomun  $E_k$  enerji düzeyinden daha düşük (veya yüksek) olan  $E_j$  enerji düzeyine geçmesiyle mümkün olur:

$$\text{Salım için: } E_k - E_j = h \cdot \nu$$



Şekil 3.1 Soğurma ve salım

### 3.3 Moleküler Salım/Soğurma Temel Prensipleri

NOT: Moleküllerin yapısı, enerji formlarını anlamak açısından önemlidir

- Lineer moleküller ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ ;  $\text{C}_2\text{H}_2$ , tüm iki atomlu moleküller):
- Üstü simetrik moleküller ( $\text{NH}_3$ ,  $\text{CH}_3\text{Cl}$ ):
- Küresel üstü simetrik moleküller ( $\text{CH}_4$ ):
- Üstü asimetrik moleküller ( $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{O}_3$ ):

#### 3.3.1 Moleküler salım/soğurma süreçlerinin temel fiziksel prensipleri:

1) Salım/soğurma süreçlerinin kökeni, gaz molekülleri ile elektromagnetik alan arasındaki enerji alışverişidir.

2) Genel olarak, molekülün toplam enerjisi aşağıdaki şekilde ifade edilebilir:

$$E = E_{\text{rot}} + E_{\text{vib}} + E_{\text{el}} + E_{\text{tr}}$$

$E_{\text{rot}}$  rotasyon kinetik enerjisidir (molekülün birim hücre olarak sahip olduğu rotasyon enerjisi): yaklaşık  $1\text{-}500\text{ cm}^{-1}$  (uzak kızıl-ötesinden mikrodalga bölgesine kadar)

**$E_{vib}$  titreşim kinetik enerjisi:** atomun denge durumuna göre titreşme enerjisi; yaklaşık  $500 \text{ to } 10^4 \text{ cm}^{-1}$  (yakın kızıl-ötesinden uzak kızıl-ötesine)

**$E_{el}$  elektronik enerji:** elektron düzeninin sahip olduğu potansiyel enerji; yaklaşık  $10^4\text{-}10^5 \text{ cm}^{-1}$  (UV (ultraviole) ve görünür)

**$E_{tr}$  dönüşüm enerjisi:** Çarpışmalar sırasında moleküller arasında meydana gelen enerji alışverişi;  $T = 300 \text{ K}$  için yaklaşık  $400 \text{ cm}^{-1}$

➤  $E_{rot} < E_{tr} < E_{vib} < E_{el}$  sıralaması şu sonuçları doğurur:

i) Rotasyonel enerjideki değişime titreşimsel bir geçiş eşlik edecektir. Bu yüzden, genellikle titreşim-rotasyon bantları oluşur.

ii) Dönüşüm enerjisinin değiştirilmesi sonucu oluşan kinetik çarpışmalar, rotasyonel seviyeleri kuvvetli bir şekilde, titreşimsel seviyeleri az miktarda ve elektronik seviyeleri de ihmal edilecek kadar az miktarda etkiler.

➤  **$E_{rot}$ ,  $E_{vib}$  ve  $E_{el}$  enerjileri kuantalanmıştır** ve sadece bir veya daha fazla kuantum sayısı tarafından belirlenen belli ayırık değerleri alabilirler. Kuantalanmış enerji seviyeleri arasında tüm geçişler mümkün değildir, bazı seçme kuralları vardır.

**3) Saf rotasyonel enerjinin yayımsal geçişleri için molekülün kalıcı bir elektrik veya magnetik dipol momente sahip olması zorunludur.**

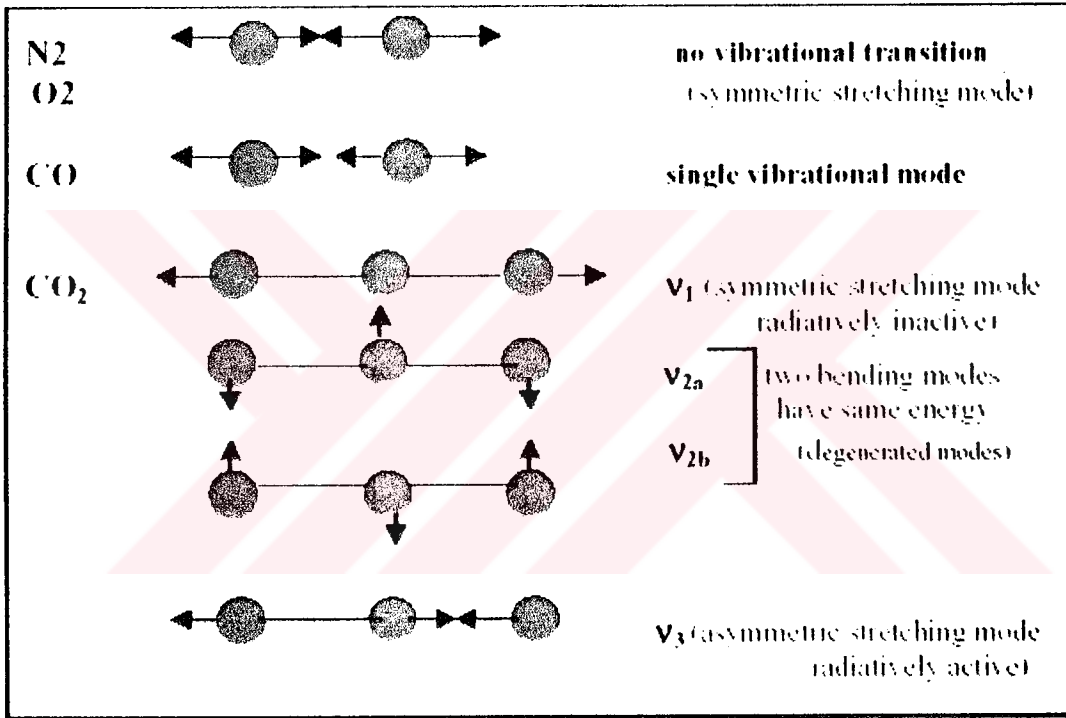
- Eğer yükler simetrik olarak dağıtılmışsa  $\Rightarrow$  kalıcı dipol moment yoktur  $\Rightarrow$  uzak kızıl-ötesinde yayımsal aktivite yoktur (rotasyonel enerjide geçiş yoktur)

Örnek: Tek çekirdekli iki atomlu moleküller ( $\text{N}_2$ ,  $\text{O}_2$ );

- $\text{O}_2$  zayıf kalıcı magnetik dipole sahiptir ve bu nedenle mikrodalga bölgesinde rotasyonel geçişe sahiptir.
- $\text{CO}$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  ve  $\text{O}_3$  molekülleri saf rotasyonel spektraya sahiptir çünkü tümü kalıcı dipollere sahiptir.
- $\text{CO}_2$  ve  $\text{CH}_4$  kalıcı dipol momente sahip değildir => saf rotasyonel geçiş yoktur. Fakat titreşimsel modlarındaki salınım yapan dipol momentlerini alabilirler => titreşim-rotasyon bantlarına sahiptirler

4) Titreşimsel enerjinin yayımsal geçişleri dipol momentte bir değişim gerektirir  
(salınım yapan moment)

Şekil 3.2 İki atomlu ve üç atomlu atmosferik moleküllerin titreşimsel modları



**NOT:** Tek çekirdekli iki atomlu moleküller olan  $N_2$  ve  $O_2$  ne rotasyonel ne de titreşimsel geçişlere sahiptir (simetrik yapılarından dolayı)  $\Rightarrow$  kızıl ötesi bölgede herhangi bir yayımsal aktivite söz konusu değildir. Fakat bu moleküller Ultraviyole bölgesinde yayımsal olarak aktif hale gelirler.

**NOT:** Atom sayısı  $N > 2$  olan moleküllerde bağımsız titreşimsel modların sayısı, lineer olmayan moleküller için  $3N-6$  ve lineer moleküller için  $3N-5$ 'dir. Hem  $H_2O$  hem de  $O_3$  üç normal banda sahiptir. .1, .2 ve .3: üçü de optik olarak aktiftir.

$CH_4$  dört normal moda sahiptir fakat sadece .3 ve .4 kızıl-ötesi bölgede aktiftir.

### 5) Elektronik geçişler

**İç yörüngelerdeki elektronlar** (atom çekirdeğine yakın olanlar) sadece yüksek enerjili fotonlar tarafından uyarılabilirler (kısa dalga UV ve X-ışınları);

**Dış yörüngelerdeki elektronlar**, UV ve görünür bölgelerin enerjilerine sahip fotonlar tarafından uyarılabilir => bu elektronlar UV ve görünür bölgede soğurma/yayın süreçlerinde rol alırlar.

- Hem atom hem de molekülde **elektronik geçişler** olabilir. Bir moleküldeki elektronik geçişler daima titreşimsel ve rotasyonel geçişlerle birlikte olur ve bir takım seçim kuralları tarafından idare edilir.

- Elektronik geçişler (yüksek enerjili UV fotonları) çeşitli fotokimyasal ve fotofiziksel sürece sebep olabilirler.

Yüksek enerjili bir fotonun soğurulması ( $AB + h\nu \rightarrow AB^*$ ) temel olarak aşağıdaki fotokimyasal ve fotofiziksel süreçlere sebep olabilir:

**Luminesans:**  $AB^* \rightarrow AB + h\nu$

**İyonlaşma:**  $AB^* \rightarrow AB + e$

**Söndürme (Quenching):**  $AB^* + M \rightarrow AB$  (M, enerjiyi AB'den uzaklaştırabilecek herhangi bir moleküldür)

**Ayrışma:**  $AB^* \rightarrow A + B$

**Kimyasal reaksiyon:**  $AB^* + C \rightarrow A + BC$

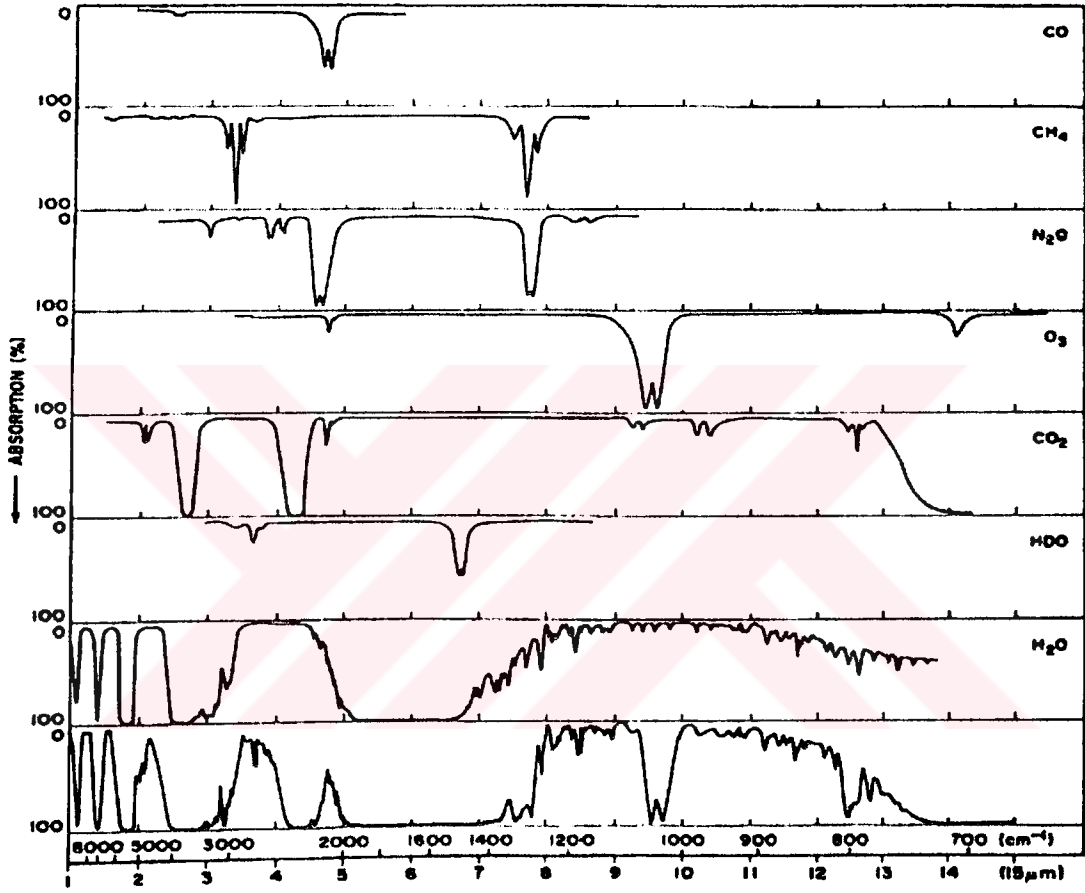
### 3.3.2 Temel Atmosferik Gazların Soğurma Spektrasi ( $H_2O$ , $CO_2$ , $O_3$ , $CH_4$ , $N_2O$ , CFCs)

- Atmosferdeki gazların tümü kendine has bir soğurma/salın spektrumuna sahiptir ve aynı zamanda kendilerine özgü bir yayım şekilleri (radiative signature) vardır.

#### ➤ Mikrodalga bölgesi

| Molekül | Soğurma hattı (Frekans, GHz) |
|---------|------------------------------|
| $H_2O$  | 22235; 183.3                 |
| $O_2$   | yaklaşık 60; 118.75          |

➤ Termal Kızıl-ötesi (IR) bölgesi



Şekil 3.3 Temel Atmosferik gazların düşük çözünürlüklü IR soğurma spektrası

Çizelge 3.1 H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, ve CFCler için en önemli titreşimsel ve rotasyonel geçişler.

| Gas              | Center<br>$\nu$ (cm <sup>-1</sup> ) ( $\lambda(\mu\text{m})$ ) | Transition                                                                                                                   | Band interval<br>(cm <sup>-1</sup> ) |
|------------------|----------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------|
| H <sub>2</sub> O | -<br>1594.8 (6.3)<br>continuum**                               | pure rotational<br>$\nu_2$ : P, R<br>far wings of the strong<br>lines, water vapor<br>dimers (H <sub>2</sub> O) <sub>2</sub> | 0-1000<br>640-2800<br>200-1200       |
| CO <sub>2</sub>  | 667 (15)<br>961 (10.4)<br>1063.8 (9.4)<br>2349 (4.3)           | $\nu_2$ : P, R, Q<br>] overtone and<br>combination<br>$\nu_3$ : P, R<br>overtone and<br>combination                          | 540-800<br>850-1250<br>2100-2400     |
| O <sub>3</sub>   | 1110 (9.01)<br>1043 (9.59)<br>705 (14.2)                       | $\nu_1$ : P, R<br>$\nu_3$ : P, R<br>$\nu_2$ : P, R                                                                           | 950-1200<br>600-800<br>600-800       |
| CH <sub>4</sub>  | 1306.2 (7.6)                                                   | $\nu_4$                                                                                                                      | 950-1650                             |
| N <sub>2</sub> O | 1285.6 (7.9)<br>588.8 (17.0)<br>2223.5 (4.5)                   | $\nu_1$<br>$\nu_2$<br>$\nu_3$                                                                                                | 1200-1350<br>520-660<br>2120-2270    |
| CFCs             |                                                                |                                                                                                                              | 700-1300                             |

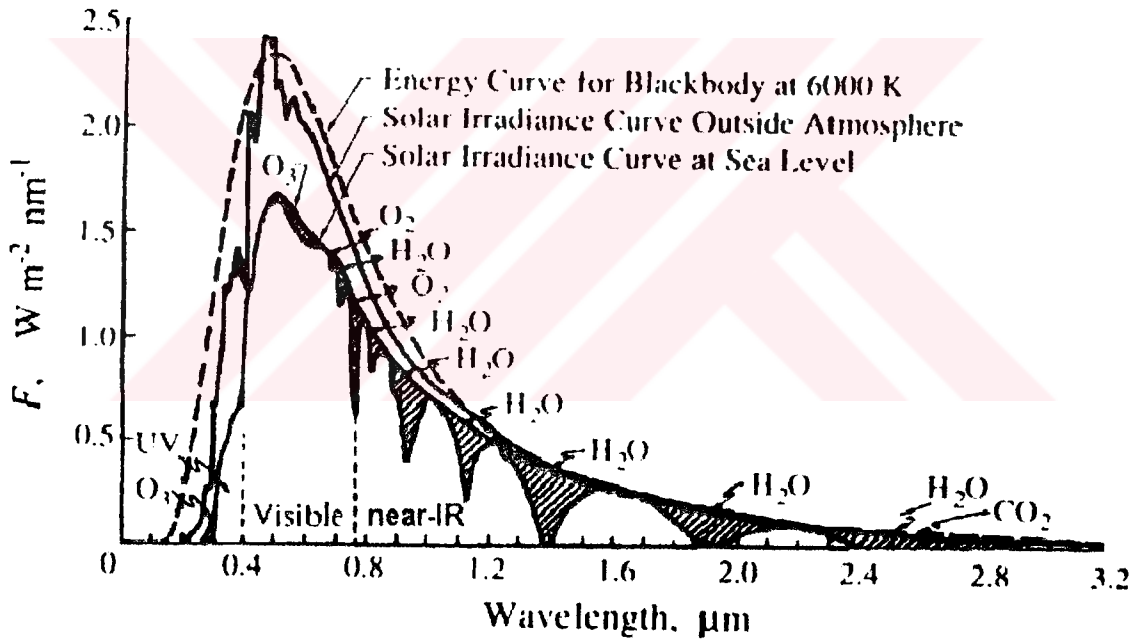
\* Su buharının 800-1200 cm<sup>-1</sup> arası bölgedeki sürekli soğurması halen açıklanamamıştır. Öngörüye göre, kızılötesi bölgedeki uzaktaki kanat hatlarının birikmiş soğurması sonucunda gerçekleşmektedir. Bu soğurma, H<sub>2</sub>O molekülleri arasındaki (self-broadening) ve H<sub>2</sub>O ile soğurmayan moleküller (N<sub>2</sub>) (foreign broadening) arasındaki çarpışma genişlemesinden (broadening) kaynaklanmaktadır.



➤ Yakın-IR ve görünür bölgeler

Görünür ve yakın IR bölgelerindeki atmosferik gaz kaynaklı soğurmanın önemli bir kısmı H<sub>2</sub>O, O<sub>3</sub>, and CO<sub>2</sub> kaynaklıdır.

**NOT:** Atmosferik gazlar görünür bölgedeki radyasyonun sadece çok küçük bir kısmını soğurur.



Şekil 3.4 Atmosferin üst kısmında ve yüzeyde güneş kaynaklı ışık yoğunluğu (flux).



Çizelge 3.2 Çeşitli gazların güneş ışığı spektrumundaki (UV + görünür) soğurma dalga boyları

| Gas                                             | Absorption wavelengths (μm) |
|-------------------------------------------------|-----------------------------|
| N <sub>2</sub>                                  | < 0,1                       |
| O <sub>2</sub>                                  | < 0,245                     |
| O <sub>3</sub>                                  | 0,17-0,35<br>0,45-0,75      |
| H <sub>2</sub> O                                | < 0,21<br>0,6-0,72          |
| H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> hydrogen peroxide | < 0,35                      |
| NO <sub>2</sub> nitrogen oxide                  | < 0,6*                      |
| N <sub>2</sub> O                                | < 0,24                      |
| NO <sub>3</sub> nitrate radical                 | 0,41-0,67                   |
| HONO nitrous acid                               | < 0,4                       |
| HNO <sub>3</sub> nitric acid                    | < 0,33                      |
| CH <sub>3</sub> Br methyl bromide               | < 0,26                      |
| CFCl <sub>3</sub> (CFC11)                       | < 0,23                      |
| HCHO formaldehyde                               | 0,25-0,36                   |

\* NO<sub>2</sub> < 0,6 μm'de soğurur, fakat < 0,4 μm'de ışıkla ayrışır

#### NOT:

a) O<sub>2</sub> ve O<sub>3</sub> için < 1 μm dalgaboylarındaki bantlar elektronik geçişlerdir.

b) Bu soğurma bantları nispeten daha az karmaşıktır çünkü, pratik olarak soğurmanın tümü molekülün ayrışması sonucunda olur (dolayısıyla üst seviye kuantalanmamıştır);

c) Düşük  $O_3$  miktarına rağmen,  $< 310$  nm dalga boylarında atmosferin alt tabakalarına güneş ışığı erişmez ( $O_3$ 'ün büyük soğurma kesiti sebebiyle);

- Elektronik geçişlerin karmaşık hesaplamalarından kaçınmak için, UV ve görünür bölgede soğuran atmosferik atomların ve moleküllerin soğurma kesitine ilişkin bir çok laboratuvar çalışması yapılmıştır. Genel olarak, soğurma kesiti sıcaklık ile değişir.



### 3.4 Moleküler Saçılma

Gaz moleküllerinden saçılmayı formüle eden Rayleigh teorisi, saçılma katsayısı için aşağıdaki ifadeyi verir (aynı zamanda Rayleigh yokolma katsayısı olarak da bilinir)

$$\alpha_R(\lambda) = [8\pi^3(n^2 - 1)^2 / 3N_g\lambda^4] [(6 + 3\delta)/(6 - 7\delta)] \quad (3.15)$$

burada  $N_g$  birim hacimdeki gaz moleküllerinin sayısıdır,  $n$  ortamın kırılma indisidir, ve  $\delta$  saçılmış radyasyonun depolarizasyon faktörüdür.

0.2 - 20  $\mu\text{m}$  aralığında çeşitli dalga boylarında  $\alpha_R$  için detaylı hesaplamalar yapılmıştır.

Moleküler saçılma, tek normalize saçılma faz fonksiyonuna sahiptir. Eğer yayılma doğrultusundan  $\theta$  açısıyla gelen saçılma radyasyonu yoğunluğu  $I(\theta)$  ile gösterilirse,  $\theta = 0^\circ$  ileri yöne, ve  $\theta = 180^\circ$  de geri yöne karşılık gelmektedir, bu durumda polarize olmayan ışık için moleküler saçılma faz fonksiyonu aşağıdaki formu alır:

$$I_{g,s}(\theta) = (3/4)(1 + \cos^2 \theta) \quad (3.16)$$

### 3.5 Parçacık Saçılması

#### 3.5.1 Saçılma Katsayısı; Soğurma Katsayısı; Zayıflama Katsayısı

Birim hacimde havada bulunan parçacıklar (veya aerosoller) için saçılma, soğurma ve zayıflama katsayıları aşağıdaki eşitliklerle verilir:

$$\alpha_{p,s}(\lambda) = N_p \int_0^{\infty} \alpha_{p,s}(\lambda, a) f(a) da \quad (3.17.);$$

$$\alpha_{p,a}(\lambda) = N_p \int_0^{\infty} \alpha_{p,a}(\lambda, a) f(a) da \quad (3.18.);$$

$$\alpha_p(\lambda) = N_p \int_0^{\infty} \alpha_p(\lambda, a) f(a) da \quad (3.19.);$$

burada  $N_p$  saçılmaya sebep olan parçacıkların adet yoğunluğu,  $\alpha_{p,s}(\lambda, a)$ ,  $\alpha_{p,a}(\lambda, a)$  ve  $\alpha_p(\lambda, a)$  de yarıçapı  $a$  olan parçacık için saçılma, soğurma ve toplam zayıflama katsayılarıdır; ve  $f(a)$  da koşullara uygun parçacık boyut dağılım fonksiyonudur

$$N'_p(a)da = N_p f(a)da \quad (3.20.);$$

$N'_p(a)da$  yarıçap içinde  $a$  ile  $a + da$  aralığında parçacık adet yoğunluğundaki değişimdir.

$\alpha_{p,s}(\lambda,a)$ ,  $\alpha_{p,a}(\lambda,a)$  ve  $\alpha_p(\lambda,a)$  katsayıları, optik bir dalganın bir aerosol ortamından geçerken saçılma, soğurma ve zayıflama sebebiyle karşılaştığı enerji kaybını karakterize eder, saçılma ve soğurma için basit bir toplamı ifade eder. Takiben aşağıdaki ifade de yazılabilir,

$$\alpha_p(\lambda) = \alpha_{p,s}(\lambda) + \alpha_{p,a}(\lambda) \quad (3.21);$$

Bir aerosol ortamı içinde yayılan radyasyonun zayıflaması için aşağıdaki ifade yazılabilir;

$$dI(\lambda) = - \alpha(\lambda) I(\lambda,z)dz \quad (3.22.);$$

(3.22) ile verilen ifadenin integrali, homojen olmayan bir ortam için iyi bilinen Beer-Lambert yasasını ifade eder:

$$I(\lambda) = I_0(\lambda) \exp[- \int \alpha_p(\lambda, z) dz] \quad (3.23.);$$

homojen bir ortam için ifade aşağıdaki formu alır:

$$I(\lambda) = I_0(\lambda) \exp[-\alpha_p(\lambda)L] \quad (3.24.);$$

$\alpha_p(\lambda)$  terimi, lineer yokolma katsayısı (birim olarak  $\text{cm}^{-1}$  ya da  $\text{km}^{-1}$ ) ya da hacim yokolma katsayısı (birim olarak  $\text{cm}^2 / \text{cm}^3$ ) olarak adlandırılır.

### 3.5.2 Tek Parçacıktan Saçılma

Küresel bir parçacıktan ışığın saçılması teorisi ilk olarak Mie tarafından 1908'de tanımlandı ve daha sonra detaylı olarak van De Hulst tarafından açıklandı. Bu teori, tek bir parçacıktan saçılma, soğurma ve toplam zayıllama etkinlik faktörleri için ilgili katsayılar cinsinden aşağıdaki eşitliklerin elde edilmesini sağlar:

$$Q_s(x,m) = \sigma_s(a, \lambda, m) / \pi a^2 \quad (3.25.);$$

$$Q_a(x,m) = \sigma_a(a, \lambda, m) / \pi a^2 \quad (3.26.);$$

$$Q_E(x,m) = \sigma_E(a, \lambda, m) / \pi a^2 \quad (3.27.);$$

Saçılma, soğurma ve toplam yokolma için bu etkinlik faktörleri sayısal olarak geometrik kesitine  $\pi a^2$  gelen enerji oranına eşittir.  $x$  ve  $m$  parametreleri, parçacığın göreceli boyut ve göreceli kırılma indisini karakterize eder:

$$x = 2\pi a / \lambda \quad (3.28.);$$

$$m = m_1 / m_2 \quad (3.29.);$$

burada  $m_1$  ve  $m_2$  parçacığın ve ortamın kompleks kırılma indisleridir. Atmosferde,  $m_2 = 1$  ve  $m_1 = n - i\kappa$  olarak düşünülebilir, burada  $n$  ve  $\kappa$  parçacık materyaline ait kompleks kırılma indisinin reel (kırılma indisi) ve imajiner (soğurma katsayısı) kısımlarıdır.

$Q_s$ ,  $Q_a$ , ve  $Q_E$  fonksiyonları, optik dalga yayılımının bulut, sis, bulutsu ve yağış gibi gerçek atmosferik koşullarda davranışını modelleyecek şekilde büyük bir  $x$  ve  $m$  parametre seti tarafından ifade edilmiştir. Elipsoid ve silindirik şekilli parçacıklar için saçılma, soğurma ve zayıflama etkinlik faktörleri belirlenmiştir. Düzensiz şekilli parçacıklar için  $Q_s$ ,  $Q_a$ , and  $Q_E$  değerlerinin teorik ve deneysel olarak belirlenmesi oldukça zordur.

### 3.5.3 Beer-Lambert Yasasının Saçılma Üzerine Uygulanabilirliğinin Sınırları

Beer-Lambert yasasını elde ederken yapılan temel varsayım, saçılmaya sebep olan ortam içindeki parçacıkların elektromagnetik radyasyonu birbirlerinden bağımsız olarak saçılmaya uğrattığıdır ve bu nedenle çoklu saçılmanın etkileri ihmal edilebilir. Aerosol bir ortamın laser ile sondası kavramı düşünüldüğünde, çoklu saçılmanın etkilerinin ihmal edilmesi demek, sonda için kullanılan laser işaretinin yansıma işaretinin alıcı sistem doğrultusunda ikinci, üçüncü vs. çoklu saçılmalarından kaynaklanan gürültüyü aşması gereklidir. Çoklu saçılma etkisi nedeniyle oluşan gürültü, saçılmaya sebep olan ortamın optik kalınlığına ve optik özelliklerine (saçılma faz fonksiyonu), sonda için kullanılan darbenin başlangıç çapı ve sapma açısına, sonda edilen hacmin mesafesine, alıcı sistemin gözleme açısına ve radyasyon dalga boyuna bağlıdır.

Bulutsuların veya bulutsuların arkasındaki bir hacmin laser sondası ile izlenmesinde, çoklu saçılmanın etkileri genellikle ihmal edilebilir, bununla birlikte bulut ve sis söz konusu olduğunda sadece sınırlı bir optik kalınlık için bu etkiler ihmal edilebilir ve bu değerler öncelikle kaynağın sapma açısına ve alıcı sistemin gözleme açısına bağlıdır.

### 3.6 Toplam Zayıflama: Atmosferin Laser ile Sondası için Etkili Dalga Boyu Bölgeleri

#### 3.6.1 Yoğun Olmayan Atmosfer

Yoğun olmayan atmosfer aerosol parçacıklarından arınmıştır ve bu pratikte mümkün değildir. Öte yandan, belli hallerde, dikkate alınması gerekir. Eğer atmosferde  $0.01 \mu\text{m}$  çapında ve bu mertebede parçacıklar mevcutsa, bu parçacıkların görünür, IR ve ötesinde optik olarak aktif olmadıkları düşünülebilir.

Yoğun olmayan atmosfer koşullarında, laser radyasyonunun toplam zayıflaması, moleküler soğurma ve moleküler saçılması tarafından belirlenir. Moleküler saçılmanın optik dalgaların zayıflatılması üzerindeki etkisini anlamak için saçılma katsayısı ile meteorolojik görülebilirliği  $V_M$  bağlayan aşağıdaki formül yardımcı olabilir. Bu ifade genellikle insan gözünün duyarlı olduğu  $0.55 \mu\text{m}$  dalga boyu için verilir:

$$\alpha (0.55 \mu\text{m}) = 3.912 / V_M \quad (3.30.);$$

bu ifade, insan gözünün renk ayırabilme duyarlılık eşiğinin 0.02 olduğu varsayımına göre hesaplanmıştır. Eğer (3.30) ifadesi başka dalga boyları için yazılırsa, ve atmosferin aerosol parçacıkları içermediği varsayılırsa,  $\lambda = 0.3, 0.4, 0.5, 0.55$  ve  $0.7 \mu\text{m}$  için karşılık gelen değerler,  $V_M = 27, 90, 230, 340$  ve  $900 \text{ km'dir}$ .

Atmosferin standart modeli için moleküler saçılma katsayıları yüksek doğruluk değerleriyle hesaplanmıştır; bu nedenle, herhangi bir laser dalga boyu için moleküler saçılma yoluyla atmosferik iletimin bileşenini hesaplamak mümkündür. Toplam zayıflama, bu yüzden, laser radyasyon dalga boyunda her bir atmosferik gazın spektral soğurmasına bağlı olarak geniş sınırlar içinde değişen moleküler saçılma katsayılarının bilinmeyen değerleri. En kuvvetli soğurma hatlarının merkezinde, radyasyon daha ilk birkaç milimetre içinde tamamen soğurulur. Hatlar arasındaki aralık duruma göre radyasyonun tamamen soğurulmadan önce bir kaç on ya da yüz metre gitmesine izin verebilir. Güçlü bantların arasındaki zayıf bantların merkezinde soğurma katsayıları  $0.1-1 \text{ km}^{-1}$  mertebesinde. Sonuç olarak, zayıf soğurma hatları arasında, moleküler soğurma katsayıları, laser dalga boyuna göre moleküler saçılma katsayılarına göre daha büyük, daha küçük ya da karşılaştırılabilir mertebede olabilir.

Laser sondası için etkili dalga boyları seçilirken, şu konular gözönüne alınmalıdır: İlk olarak, kullanılan dalga boyu için atmosferik iletim ne kadar yüksekse, sonda için kullanılan darbe atmosferde o kadar uzağa erişebilir; diğer taraftan, kuvvetli bir yansıma işareti için soğurulma ve saçılma pahasına da olsa laser darbesinin atmosferle belli bir miktar etkileşimde bulunması avantajlıdır.

### 3.6.2 Bulutsular

Bulutsular söz konusu olduğunda toplam zayıflama üç bileşenden oluşur. Moleküler saçılma ve soğurmaya ilaveten, aerosol saçılma da dikkate alınmalıdır. Bulutsular için, aerosol zayıflama katsayıları parçacıkların yoğunluğuna, büyüklüğüne ve kimyasal bileşimine bağlı olarak geniş sınırlar içinde değişebilir. Aynı zamanda, laser frekansı aralığında, moleküler saçılma katsayıları da aerosol saçılma (zayıflama) katsayıları gibi sabittir.

Meteorolojik görünebilirlik aerosol ve moleküler saçılmanın ortak etkisi tarafından belirlenir ve pratikte sabit olarak düşünülebilir. Bunun da ötesinde, moleküler saçılma katsayısı dalga boyuyla birebir bağlıdır; fakat bu aerosol saçılma katsayısı için geçerli değildir. Bu nedenle bulutsular içinde, aerosol zayıflama katsayısı ve moleküler saçılma katsayısının görelî boyutlarına göre oldukça çeşitli durumlar gerçekleşebilir. Bu çeşitliliğin bazı özellikleri şunlardır: en çok görülen meteorolojik koşullar altında (yer seviyesinde görüş mesafesi  $\approx 10$  km), aerosol zayıflama ve moleküler saçılma katsayıları aynı mertebelerdedir. Görünür bölgede aerosol zayıflama, moleküler saçılmaya göre önemli ölçüde daha kuvvetlidir. Sonuç olarak, kırmızı ötesi bölgede, moleküler saçılma aerosol saçılmaya göre ihmal edilebilir.

Laser dalga boyları için en geçirgen spektral aralıklar, bir tarafta aerosol ve moleküler saçılma katsayılarının minimum olduğu yerlerde, diğer tarafta da atmosferik iletimin makro ve mikro pencerelerinin bulunduğu yerlerde bulunurlar. Bu aralıkların büyük bir kısmı, uzun-dalga iletim penceresine karşılık gelen 8-13  $\mu\text{m}$  dalga boyu aralığında yer alır. Aerosol saçılma kullanılarak laser ile atmosferin izlenmesinde bu dalga boyu aralığının kullanılmasının görünür bölgeye göre belirli bir avantajı vardır çünkü, bu bölgede aerosol parçacıkların saçılma faz fonksiyonu daha az ileri gerilmeye sahiptir, bu nedenle de daha fazla radyasyon geriye saçılır.

## 4 PARÇACIK VE GAZLARIN ELASTİK GERİ- SAÇILMA VE DİFERANSİYEL SOĞURMA YOLUYLA LİDAR ÖLÇÜMLERİ

Elektromagnetik enerji atmosferdeki gazlar tarafından ve aynı zamanda küçük parçacıklar ve damlalar tarafından da saçılmaya uğratılır. Laserler tarafından üretilen optik ve optiğe yakın dalga-boyları söz konusu olduğunda, bu saçılma atmosferin gözlenmesi için radar prensibinin kullanılması için yeterlidir. Atmosferdeki gazlardan veya asılı duran parçacıklardan kaynaklanan saçılmayı laser radarları veya lidar kullanılarak ölçüm yapmak mümkündür. Bununla birlikte, parçacık bulutlarının veya tabakalarının yerini ve mevcudiyetini ve parçacık yoğunluğundaki homojenlikten sapmayı izleyerek atmosferin yapısını ve hareketini izlemek mümkündür. Üstelik bu ölçümlerin tümü tek bir noktadan ve atmosferik soğurmanın gözlenebildiği yol boyunca gözlenebilmektedir. Bu yolla, yani belirli dalga boylarındaki enerjiyi kullanarak, dalganın yayılma doğrultusu boyunca rezonant soğurma sayesinde parçacığın miktarına ilişkin ölçümler yapılabilir.

### 4.1 Laser ile Işığın Tespiti ve Mesafe Tayini Prensipleri (LIDAR)

Atmosferin uzaktan radar prensibine göre laser kullanılarak izlenmesine LIDAR denir ve, ışığın tespiti ve mesafe tayini anlamındaki *Light Detection and Ranging* kısaltılarak elde edilmiştir.

En basit haliyle lidar, yeterince kısa zaman aralıklı gereken genlikte bir darbe kaynağı olarak laser kullanır. Tipik olarak Q-switched ruby (dalga boyu  $\lambda = 0.69 \mu\text{m}$ ) ya da neodymium ( $\lambda = 1.06 \mu\text{m}$ ) laser sistemleri kullanılır, bunlar onlarca megawatt gücünde ve 10-20 nano saniye mertebesinde darbeler üretebilirler. Bu düzeydeki enerji (1 Joule mertebesinde) uygun optik sistemler kullanılarak ışın formatında hedefe yöneltir. Çünkü laser ışığı hemen hemen monokromatiktir ve yüksek mertebede koherenttir ve bu tür ışınlar oldukça düşük bir dağılmaya uğrarlar.

Gönderilen laser enerjisi atmosfer içinde ilerlerken, gaz molekülleri, parçacıklar ve damlalar saçılmaya sebep olurlar. Bu enerjinin küçük bir kısmı lidar sistemi doğrultusunda geri saçılır ve bu enerji sistem tarafından tespit edilebilir. Yayılma doğrultusundaki saçılma ya da parçacıklar tarafından sebep olunan soğurma, ışının yoğunluğunun düşmesine sebep olur ve bu durumda zayıflatıldığı söylenir. Bu türden zayıflama hem gidiş hem de geri saçılma doğrultusunda söz konusudur.

Lidar sisteminde, geri saçılan enerji, uygun bir alıcı ya da kırılma sistemi tarafından toplanır ve bir foto-alıcıya (photodetector) iletilir (çoğunlukla bir foto-çoklayıcı (photo-multiplier)). Bu, yoğunluğu herhangi bir anda alınan optik gücün miktarıyla orantılı bir elektrik işareti üretir. Işığın hızı bilindiğinden, herhangi bir anda saçılmaya sebep olan hacimden alınan işaretin mesafesi, darbenin iletildiği zamandan itibaren olan aralık kullanılarak hesaplanabilir. Alınan işaretin genliği, iki yollu atmosferik zayıflama ve belli mesafelerdeki atmosfergeri saçılma özellikleri kullanılarak belirlenebilir. Atmosferik geri-saçılma, kullanılan laser enerjisinin dalga boyu ile gelen enerjinin yolundaki parçacıkların ve damlaların (veya moleküllerin) sayısına, büyüklüğüne şekline ve kırma özelliklerine bağlıdır. Genel olarak geri saçılma, saçılmaya sebep olan maddelerin yoğunluğunun artmasıyla artar.

Bu nedenle foto-alıcı tarafından tespit edilen elektrik işareti, atmosferdeki saçıcı ve soğurucuların varlığı, mesafesi ve yoğunluğuna ilişkin bilgiyi içerir. Bu işaretlerin analiz edilmesi ve sunulmasına ilişkin pek çok yöntem mevcuttur. En basit haliyle, bir osiloskoptaki koordinat sisteminde alınan işaretin yoğunluğu mesafenin bir fonksiyonu olarak gösterilebilir. Bu işaretler oldukça geniş aralıklı olduğundan (1 km mesafe zaman aralığı olarak 7  $\mu$ s ile ifade edilir), anlamlı veri sunumu gerçekleştirebilmek için bu osiloskop çıktılarının fotoğraflanması gereklidir.

Yapılan ölçümlerin hem nitel hem de nicel olarak kalitesini belirleyen en önemli faktör, işaret üzerine etkiyen dış kaynaklı gürültüdür. Bunlar, mevcut elektrik sisteminin sebep olduğu termal gürültü, foto alıcının sebep olduğu gürültü, muhtemelen de en önemlisi, normalde güneş kaynaklı olan, ortamın aydınlığından kaynaklı optik gürültüdür. Laser ışığının yüksek monokromatikliği sayesinde, kullanılan laser frekansı merkezli bir dar bant filtre kullanılarak ortam ışığından kaynaklanan gürültü önemli ölçüde azaltılabilir.

Laser enerjisinin oldukça yüksek oranda doğrultulmuş olmasından dolayı, gönderilen enerjinin tümünün dar bir ışın (tipik olarak 2 veya 3 miliradyan sapmaya sahip) olarak hedefe yönlendirilmesi mümkündür. Buna göre de, alıcı sistemin alanı bu açıya sınırlandırılabilir ve bu da sisteme giren ortam ışığının miktarını azaltır.

## 4.2 Lidar Eşitliğinin Saçılma Formu

Darbeli ve monostatik lidar kullanılması durumunda, ( $R$ ,  $R + \Delta R$ ) mesafe aralığındaki moleküller için ( $\lambda$ ,  $\lambda + \Delta\lambda$ ) dalga boyu aralığında alıcı tarafından tespit edilen işaret gücünün  $\Delta P(\lambda, R)$  artışı aşağıdaki şekilde ifade edilir:

$$\Delta P(\lambda, R) = \int J(\lambda, R, r) \cdot \Delta \lambda \cdot \Delta R \cdot p(\lambda, R, r) \cdot dA(R, r) \quad (4.1.);$$

burada;

$J(\lambda, R, r)$ , birim mesafe aralığı başına  $R$  mesafesindeki hedef düzlemde  $r$  noktasında,  $\lambda$  dalga boyunda, laser tarafından oluşturulan spektral aydınlanmayı (radiance) temsil eder;

$dA(R, r)$ ,  $r$  noktasında  $R$  mesafesindeki hedef düzlemin alanını verir;

$p(\lambda, R, r)$ ,  $R$  mesafesindeki  $r$  noktasından  $\lambda$  dalga boyunda gelen radyasyonun alıcıya çarpma olasılığını temsil eder.

Bu olasılığı etkileyen pek çok faktör vardır. Bunlar, geometrik varsayımlar, atmosferik zayıflama, alıcı optiği ve spektral iletim karakteristiğidir. Bununla birlikte bu etkiler ayrılarak eşitlik aşağıdaki formda yazılabilir;

$$p(\lambda, R, r) = \frac{A_0}{R^2} \times T(\lambda, R) \times \xi(\lambda) \times \xi(R, r) \quad (4.2.);$$

burada;

$A_0/R^2$ , alıcı optik sistemin alış açısını (acceptance solid angle) temsil eder ( $A_0$  merceğin veya aynanın alanıdır);

$T(\lambda, R)$ , R mesafesinde  $\lambda$  dalga boyundaki atmosferik iletim faktörüdür;

$\xi(\lambda)$ , alıcının spektral iletim faktörünü temsil eder ve monokromatör gibi seçici elemanların spektral etkilerini de içerir;

$\xi(R, r)$ , R mesafesindeki hedef düzlemdeki r noktasından alıcıya ulaşan radyasyonun olasılığını temsil eder, geometrik varsayımlara dayanır.

Şimdilik,  $\xi(R, r)$ 'nin sadece alıcı optiğin alış açısında laser aydınlanmasının oluşturduğu alana bağlı olduğu varsayılacaktır. Bu nedenle  $\xi(R, r)$ , literatürde "geometrik form faktörü" veya "overlap faktörü" olarak adlandırılır.

"Hedef spektral aydınlanması"  $J(\lambda, R, r)$ , laser radyasyonu ile hedef alınan ortamın etkileşiminin doğasına bağlıdır. Saçılma durumunda (elastik veya inelastik)

$$J(\lambda, R, r) = \beta(\lambda_L, \lambda, R, r) I(R, r) \quad (4.3.);$$

burada  $I(R, r)$ , R mesafesindeki r noktasındaki laser aydınlanmasıdır, ve

$$\beta(\lambda_L, \lambda, R, r) = \sum_i N_i(R, r) \left\{ \frac{d\sigma(\lambda_L)}{d\Omega} \right\}_i^s L_i(\lambda) \quad (4.4.);$$

de “hacim geri saçılma katsayısı” olarak adlandırılır ve

$N_i(R, r)$ , saçılmaya sebep olan  $I$  türünün sayısal yoğunluğunu temsil eder;

$\left\{ \frac{d\sigma(\lambda_i)}{d\Omega} \right\}_i$ ,  $\lambda_i$  dalga boyundaki laser radyasyonunun yarattığı diferansiyel saçılma

kesit alanını verir;

$L_i(\lambda) \Delta(\lambda)$ ,  $(\lambda, \lambda + \Delta\lambda)$  dalga boyu aralığına düşen saçılan radyasyonun bir kısmını verir.

Yayılan (ışık hızında) laser darbesinin yükselen kenarının  $R$  mesafesine ulaşmasına ve dönen radyasyonun lidara ulaşmasına karşılık gelen zamanda, alıcı tarafında  $t (= 2R / c)$  anında tespit edilen işaretin gücü aşağıdaki formül ile ifade edilir;

$$P(\lambda, t) = \int_0^{R=ct/2} dR \int_{\Delta\lambda_0} d\lambda \int J(\lambda, R, r) \cdot p(\lambda, R, r) \cdot dA(R, r) \quad (4.5.);$$

Mesafenin integrali alınırken dikkat edilmesi gereken konu, alıcıya  $t$  anında ulaşan radyasyon sadece  $ct/2$  mesafesinden değil, saçılmanın meydana geldiği noktadan itibaren yol laser darbesinin yolu üzerindeki her noktadan gelmektedir. Dalga boyu integrasyonunun menzili, yaklaşık  $\lambda$  merkezli olmak üzere lidar alıcısının  $\Delta\lambda_0$  spektral penceresi boyuncadır. Eğer (4.2) ve (4.3) eşitlikleri kullanılırsa, aşağıdaki eşitlik yazılabilir;

$$P(\lambda, t) = A_0 \int_0^{R=ct/2} \frac{dR}{R^2} \int_{\Delta\lambda_0} \xi(\lambda).d\lambda$$

$$\times \int \beta(\lambda_L, \lambda, R, r).T(\lambda, R).\xi(R, r).I(R, r).dA(R, r) \quad (4.6.);$$

Bazı basitleştirmeler yaptıktan ve pratikteki bazı durumları gözönüne aldıktan sonra, belli bir anda R mesafesine doğru yayılan bir laser darbesinin yükselen kenarına karşılık gelen alıcıda tespit edilen toplam saçılan laser gücü aşağıdaki şekilde yazılabilir

$$P(\lambda, R) = P_L \frac{A_0}{R^2} \cdot \xi(\lambda) \cdot \beta(\lambda_L, \lambda, R) \cdot \xi(R) \frac{c\tau_L}{2} \cdot e^{-\int_0^R \kappa(R) dR} \quad (4.7.);$$

burada;

$e^{-\int_0^R \kappa(R) dR}$  R mesafesine olan atmosferik iletim faktörünü temsil eder;

ve

$$\kappa(R) = \kappa(\lambda_L, R) + \kappa(\lambda, R) \quad (4.8.);$$

iki taraflı zayıflama katsayısıdır ve  $P_L \equiv E_L / \tau_L$  laser darbesinin ortalama gücüdür.

Elastik (Mie veya Rayleigh) saçılma durumunda, gözlem dalga boyu değişmez bir şekilde laser dalga boyu ile aynıdır ve şu şekilde yazılabilir;

$$P(\lambda_L, R) = P_L \frac{A_0}{R^2} \xi(\lambda_L) \beta(\lambda_L, R) \xi(R) \frac{c\tau_L}{2} e^{-2 \int_0^R k(\lambda_L, R) dR} \quad (4.9.);$$

Özet olarak, (4.7) eşitliği, literatürde en çok bahsi geçen saçılma için lidar eşitliğidir ve (4.9) eşitliği de özel bir hal olan ve giderek daha çok popülerlik kazanan diferansiyel soğurma tekniklerine karşılık gelen halini ifade eder.

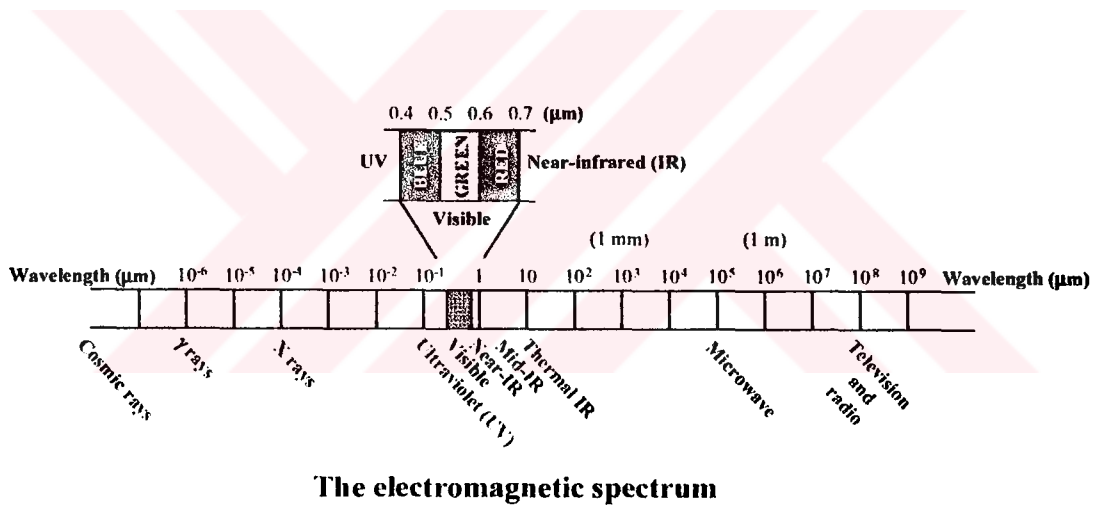
### 4.3 Diferansiyel Soğurma LIDAR (DIAL) Ölçümlerinin Prensipleri

Havada bulunan veya oluşan gaz kirleticilerin büyük bir yoğunluğu, spektrumun ultra viole (UV), görünen (VIS) veya kızıl ötesi (IR) bölgelerinde optik soğurma bantları sergilerler. Şekil 4.1'de dalga boyu cinsinden elektromagnetik spektrumu göstermektedir. Işığın dalga boyu, uzak kızıl ötesinde yaklaşık 1 mm'den ekstrem ultra viole'de yaklaşık 10 nm'ye kadar bir aralıkta yayılır. Uzak bir mesafedeki gaz kirleticilerin yoğunluğu laser darbesi kullanılarak izlenebilir, bunun için, gazın kuvvetli bir soğurma bandına karşılık gelen bir dalga boyundaki soğurması ile buna çok yakın fakat gazın soğurmadığı bir dalga boyundaki soğurma miktarı karşılaştırılır. Bu, hava kirleticilerin yoğunluklarının ayarlanabilir darbeli LIDAR ölçümleri ile tespitinin temel prensibidir.



Diferansiyel Soğurma LIDAR (DIAL), nitrojen dioksit, ozon, kükürt dioksit ve civa buharı gibi atmosferik kirleticilerin izlenmesinde başarılı bir şekilde kullanılmaktadır. Laser, UV, VIS, yakın IR ve termal IR bölgeleri arasında ayarlanabilmektedir. Bu değişik dalga boylarında soğurmada gözlenen fark, havadaki kirleticilerin yoğunlukların tespitinde kullanılabilir.

DIAL sistemi için genel performans gereklilikleri, gönderilen dalga boyunun fonksiyonu, ilgilenilen kirletici ve buna karşılık gelen enerji ve spektral hat genişliği aşağıda Çizelge 4.1'de özetlenmiştir.



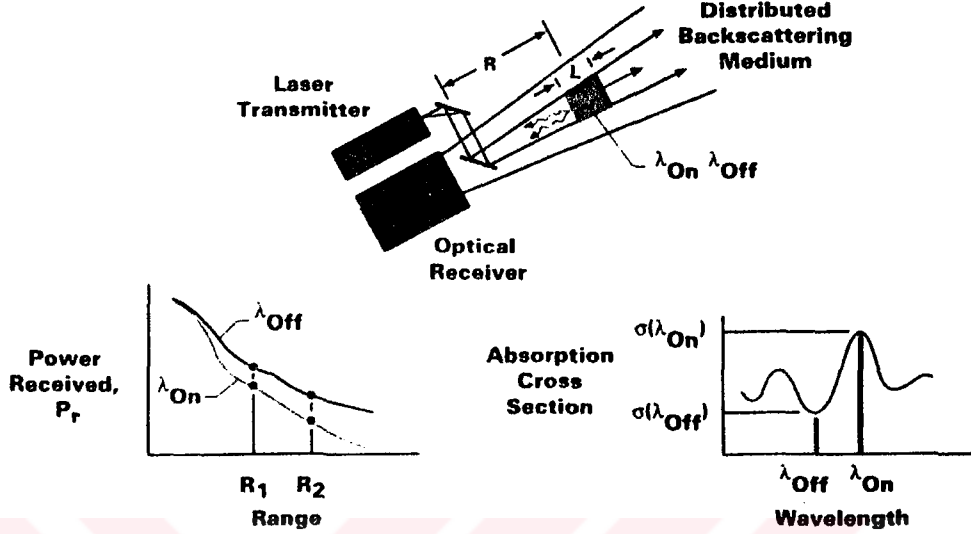
Şekil 4.1 Ozon ve  $\text{NO}_2$ 'nin DIAL ölçümleri için UV ve görünür mavi bantlar



| Gerekli dalga boyu aralığı | İlgilenilen Kirleticisi             | Tespit gereklilikleri | 30 Hz'deki enerji | Gerekli spektral hat genişliği |
|----------------------------|-------------------------------------|-----------------------|-------------------|--------------------------------|
| 250 - 260 nm               | Benzen, Toluen, Xylen               | düşük ppb             | 25 mJ             | 3 GHz                          |
| 280 - 300 nm               | Ozon (O <sub>3</sub> )              | 80 - 100 ppb          | 25 mJ             | 3 GHz                          |
| 298 - 300 nm               | Kükürt dioksit (SO <sub>2</sub> )   | 20 ppb                | 25 mJ             | 3 GHz                          |
| 250 nm                     | Formaldehit (CH <sub>2</sub> O)     | düşük ppb             | 25 mJ             | 3 GHz                          |
| 435 nm                     | Nitrojen dioksit (NO <sub>2</sub> ) | 30 ppb                | 25 mJ             | 3 GHz                          |
| 350 nm                     | Moleküler klor (Cl <sub>2</sub> )   | düşük ppb             | 25 mJ             | 3 GHz                          |
| 368 nm                     | Nitrus asit (HNO <sub>2</sub> )     | düşük ppb             | 25 mJ             | 3 GHz                          |
| 2.47 µm                    | Hidrflorik asit (HF)                | düşük ppb             | 25 mJ             | 600 MHz                        |
| 1.65 µm                    | Metan (CH <sub>4</sub> )            | düşük ppb             | 25 mJ             | 600 MHz                        |
| 1.78 µm                    | Hidroklorik asit (HCl)              | düşük ppb             | 25 mJ             | 600 MHz                        |

Çizelge 4.1. Gaz kirleticilerin DIAL teknolojisi ile ölçümleri için genel sistem özellikleri

## Differential Absorption Lidar (DIAL) Concept



$$N_A = \frac{1}{2(R_2 - R_1) [\sigma_A(\lambda_{On}) - \sigma_A(\lambda_{Off})]} \ln \left[ \frac{P_{rOn}(R_1) \times P_{rOff}(R_2)}{P_{rOff}(R_1) \times P_{rOn}(R_2)} \right]$$

Şekil 4.2 – Genel olarak DIAL kavramı

Geri saçılmanın miktarı, saçılmaya sebep olan maddelerin yoğunluğunu gösterir. Bu, bulutların taban yüksekliğinin veya bir kirlilik bulutunun izlenmesinde kullanılabilir. Atmosferin özellikleri de dönen lidar işaretlerinin incelenmesiyle tespit edilebilir. Doppler etkisi sebebiyle ışığın frekansındaki ufak bir kayma sayesinde de rüzgar hızı tespit edilebilir. Depolarizasyon miktarı tespit edilerek, sıvı damlalar ile küresel olmayan buz parçacıkları birbirinden ayırdedilebilir. Seçilen moleküllerden dönen dalga boyu kaymış işaretlerin ölçülmesiyle su buharı gibi belirli atmosferik elemanlar Raman Lidar kullanılarak tespit edilebilir.

Atmosferik gazların yoğunluklarının ölçülmesinde, daha büyük mesafelerden gelen geri saçılmanın da daha az olmasının kanıtlandığı gibi, DIAL sistemi soğurmayı kullanır. Hava durumu tahmini, iklim modellemesi ve hava kirliliğinin izlenmesinde, yüksekliğin veya bulunulan noktanın fonksiyonu olarak atmosferdeki maddelerin (aerosol parçacıkları, buz kristalleri, su buharı, nadir gazlar ve ozon gibi) dağılımlarının bilinmesi gereklidir.

#### 4.3.1 DIAL Prensibi

DIAL prensibi, şematik olarak Şekil 4.2'de gösterilmiştir. Laser darbeleri atmosfere gönderilir, şimdilik atmosferde (gerçekçi olmayan bir şekilde) Mie saçılmasına sebep olan parçacıkların uniform dağılıma sahip olduğu varsayılacaktır. Endüstriden kirlenici bir gaz havaya salınır ve uniform dağılmış parçacıkların arasına girerek “topografik hedefler” sunar. Endüstri kaynaklı çıkıntının başka parçacıklar içermediği varsayılmaktadır. Laser ışığı, ilgilenilen türlerin soğurduğu ( $\lambda_{on}$ ) dalga boyunda ve buna komşu, soğurmanın olmadığı (off-resonant) dalga boyunda ( $\lambda_{off}$ ) dönüşümlü olarak gönderilir. Soğuran bir gaz bulutunun olması durumunda, ( $\lambda_{on}$ ) dalga boyundaki işaret bulut içinden geçerken zayıflatılır fakat ( $\lambda_{off}$ ) dalga boyundaki işaret zayıflatılmaz. Eğer parçacık yoğunluğu düşükse, ( $\lambda_{off}$ ) işareti tam olarak  $1/R^2$  değişimi gösterecektir, bununla birlikte gazla karşılaşıldığı durumlarda ( $\lambda_{on}$ ) işareti için ilave kayıplarla karşılaşılacaktır. İki eğri arasındaki fark en iyi, ilgili aralık için birbirlerine bölünmeleriyle gözlenir. Birbirinin aynısı eğriler için, tüm mesafelerde birim bir oran elde edilir. Bu sadece, dalga boyu  $\lambda_{on}$ 'dan  $\lambda_{off}$ 'a değişirken, parçacıklardan kaynaklanan Mie saçılması değişmiyorsa doğrudur. Uniform büyüklüklü (mono-disperse parçacıklar) küresel parçacıklar için, Mie saçılması kesit alanı, dalga boyunun bir fonksiyonu olarak kuvvetli bir salınım davranışı sergiler. Bununla birlikte, doğal atmosfer için, parçacıkların büyüklükleri şekilleri sürekli olarak değişir ve salınımlar etkisini yitirir. Bu yüzden pratikte, eğer dalga boyu aralığı küçükse, on ve off bölünmesi durumdan etkilenmez. Elde edilen eğriye DIAL eğrisi denir.

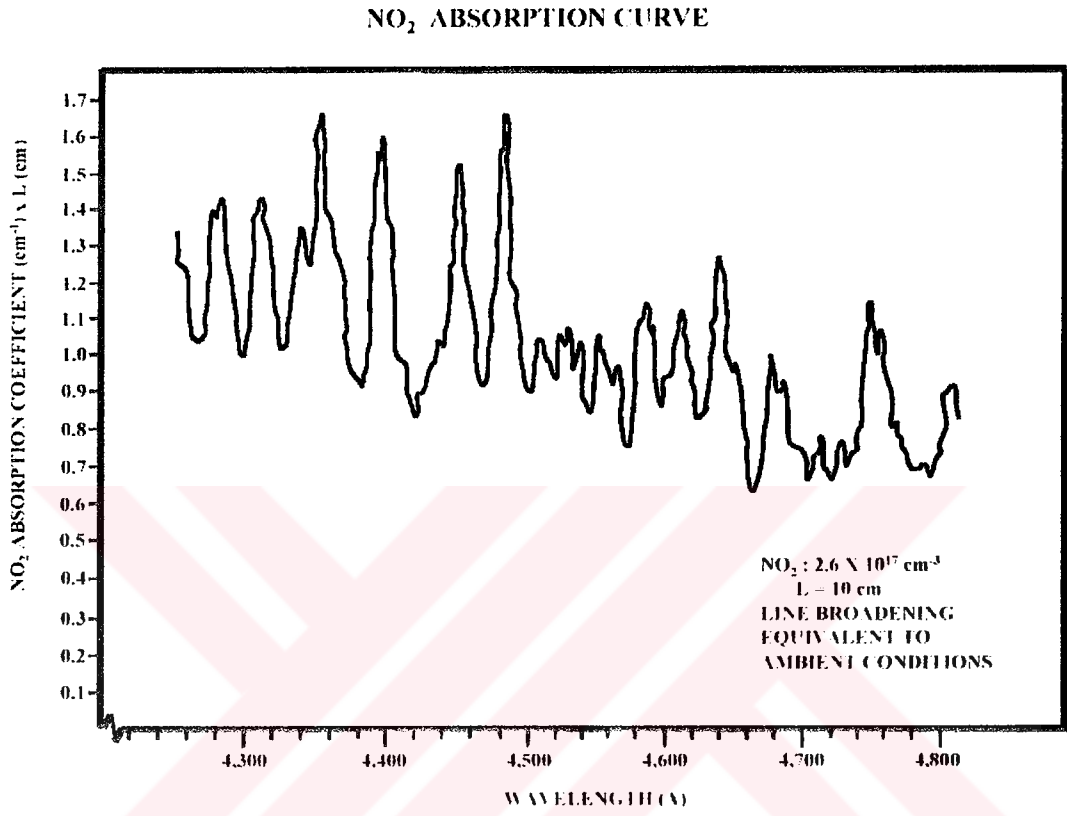
Bir gaz bulutu ile karşılaşıldığında, bu oran eğrisinde aşağı doğru bir kıvrılma olur, bulut geçtikten sonra eğri eski yatay doğrultusunda fakat biraz daha aşağıdan ilerlemeye devam eder. DIAL eğrisinden, gazın diferansiyel soğurma kesit alanını kullanarak Beer-Lambert yasası aracılığıyla gaz yoğunluğunu mesafenin bir fonksiyonu olarak elde etmek mümkündür.

Bu noktada, başlangıçta yapılan ve gerçekçi olmayan uniform parçacık dağılımı varsayımına ihtiyaç olmadığı görülebilir. Bölgesel olarak geri saçılmayı kuvvetli bir şekilde artıracak ilave parçacıkların olması durumunda bile, on ve off rezonans eğrilerinde gözlenecek yukarı kıvrılma eşit olacaktır ve bu nedenle de oran (DIAL) eğrisinde görülmeyecektir. Bir çok problem kaynağı ve bilinmeyen parametre bölme işlemi sırasında ortadan kalkar ve sadece diferansiyel soğurma kesit alanı bilgisi ile gaz yoğunluğu mesafenin bir fonksiyonu olarak hesaplanabilir.

#### 4.3.2 Troposferik Nitrojen Dioksit

Nitrojen dioksit, nispeten ölçülmesi daha kolay bir gazdır çünkü, soğurma bantları spektrumun görünür bölgesindedir ve bu nedenle de doğrudan optik parametrik osilatörün çıkışı aracılığıyla, frekansı iki katına çıkarmaya ihtiyaç duymadan elde edilebilir. Bu nedenle, nispeten daha yüksek darbe enerjileri kullanılabilir. Ayrıca, 4,500 Angstrom civarında, nitrojen dioksitin soğurması hemen hemen hiç interferans içermez. (Bu molekülün güçlü görünür soğurma bandı ölçümü kolaylaştırır, ayrıca gökyüzünün mavi rengini kaybetmesine de sebep olur; bu yüzden, sis-duman karışımının kahverengi olması sadece içerdiği kurum ve parçacık maddelerden dolayı değil mavi ışığın da azlığından dolayıdır.) Nitrojen dioksit, 4,478.5 Angstrom on-rezonans dalga boyu ve 4,500.0 Angstrom off-rezonans dalga boyu kullanılarak ölçülebilir. On-rezonans soğurma kesit alanı  $6.38 \times 10^{-19} \text{ cm}^2/\text{molekül}$ ; off-rezonans

soğurma kesit alanı da  $3.5 \times 10^{-19} \text{ cm}^2/\text{molekül}$ dür.  $\text{NO}_2$  spektrumu Şekil 4.3'de gösterilmiştir.



Şekil 4.3.  $\text{NO}_2$  soğurma spektrasi

#### 4.4 DIAL Eşitliği

Laser radyasyonunun belirli moleküller tarafından diferansiyel soğurulması, belli atmosferik elemanların ölçülmesinde hem duyarlı hem de seçici bir yöntem sunar. Bu ölçümlerin yapılabileceği iki yol vardır. Her iki yol da aralarında çok az fark olan iki farklı laser darbesi (bir tanesi ilgili maddenin kuvvetli soğurma özelliğine uygun olarak seçilen diğeri de bunun kanadında olacak şekilde seçilmiş) ve bu iki darbenin zayıflamalarının karşılaştırılmasına dayanır. Bu teknikler arasındaki farklar, dönen lidar işaretinin alıcı sistemde seçilen mekanizmadan kaynaklanır. Bunlardan birincisi, atmosferik aerosol ve parçacıklardan kaynaklanan elastik saçılma durumu söz konusudur, ve bu yönüme DAS (Differential Absorption and Scattering (Diferansiyel soğurma ve saçılma)) olarak adlandırılır. Diğer yaklaşım, uygun bir şekilde yerleştirilmiş topografik bir hedeften saçılan laser radyasyonuna dayanır.

DAS yaklaşımında,  $\lambda_0$  ilgilenilen molekülün soğurma bandının merkezine denk gelen dalga boyu ve iki laser dalga boyu ve  $\lambda_0 + \delta\lambda$  da bunun yakınındaki bir dalga boyu olmak üzere,  $\lambda_0$  ve  $\lambda_0 + \delta\lambda$  seçilir. Eğer eşitlik (4.9) (lidar eşitliğinin elastik-saçılma formu) kullanılırsa ve  $\lambda_0 + \delta\lambda$  için  $\lambda_w$  yazılırsa, iki dalga boyu için dönen işaretlerin güçleri oranı;

$$\frac{P(\lambda_0, R)}{P(\lambda_w, R)} = \frac{\xi(\lambda_0)\beta(\lambda_0, R)}{\xi(\lambda_w)\beta(\lambda_w, R)} e^{-2 \int_0^R \{\kappa(\lambda_0, R) - \kappa(\lambda_w, R)\} dR} \quad (4.10.);$$

ile verilir ve burada her iki dalga boyu için de laser çıkış gücünün aynı olduğu varsayılmıştır.

Eğer ilgilenilen molekülden kaynaklanan soğurma toplam zayıflatma katsayısından ayrılırsa, aşağıdaki eşitlik elde edilebilir:

$$\int_0^R N(R) \sigma_{\Lambda}(\lambda_0 : \lambda_w) dR = \frac{1}{2} \ln \left[ \frac{P(\lambda_w, R) \xi(\lambda_0) \beta(\lambda_0, R)}{P(\lambda_0, R) \xi(\lambda_w) \beta(\lambda_w, R)} \right] - \int_0^R \left\{ \bar{\kappa}(\lambda_0, R) - \bar{\kappa}(\lambda_w, R) \right\} dR$$

(4.11.);

burada *diferansiyel soğurma kesit alanı* aşağıdaki eşitlik ile tanımlanmıştır;

$$\sigma(\lambda_0 : \lambda_w) \equiv \sigma^{\Lambda}(\lambda_0) - \sigma^{\Lambda}(\lambda_w) \quad (4.12.);$$

ve toplam zayıflatma katsayısı da genel olarak aşağıdaki formda verilir;

$$\kappa(\lambda, R) = \bar{\kappa}(\lambda, R) + N(R) \sigma^{\Lambda}(\lambda) \quad (4.13.);$$

$\bar{\kappa}(\lambda, R)$ , ilgilenilen molekülün soğurmasının katkısı hariç olmak üzere zayıflatma katsayısıdır,  $N(R)$  ile bu moleküllerin  $R$  mesafesindeki sayısal yoğunluğu verilir, ve  $\sigma^{\Lambda}(\lambda)$  ile de  $\lambda$  dalga boyundaki soğurma kesit alanı verilir.

Diferansiyel formda eşitlik (4.11) aşağıdaki hale gelir:

$$N(R) = \frac{1}{2\sigma^{\wedge}(\lambda_0 : \lambda_w)} \left[ \frac{d}{dR} \left\{ \ln \left[ \frac{P(\lambda_w, R)}{P(\lambda_0, R)} \right] - \ln \left[ \frac{\beta(\lambda_w, R)}{\beta(\lambda_0, R)} \right] \right\} + \bar{\kappa}(\lambda_w, R) - \bar{\kappa}(\lambda_0, R) \right]$$

(4.14.);

burada,  $\delta\lambda$  küçük aralığında alıcının spektral iletim faktörünün etkin olarak dalga boyundan bağımsız olduğu varsayılmıştır:

$$\xi(\lambda_0) \approx \xi(\lambda_w)$$

Hacim geri saçılma katsayısı  $\beta$  ve tortu zayıflatma katsayısı  $\bar{\kappa}$  'nın  $\delta\lambda$  küçük aralığında dalga boyundan bağımsız olduğu varsayılarak ilave basitleştirmeler sağlanabilir.

Eğer bu diferansiyel soğurma tekniği *topografik* bir saçılmaya uğraticı ile birlikte kullanılırsa, duyarlılık bakımından ciddi bir iyileştirme sağlanabilir. Bununla birlikte, duyarlılıktaki bu kazanç, mesafe çözünürlüğündeki kayıp pahasına olmaktadır, bu nedenle bu teknik sadece laser yolu üzerindeki molekül yoğunluklarının üzerinde hesap yapmaya değecek mertebede olduğu durumlar için uygulanabilir. Bu şartlar altında, işaretin gücü eşitliği aşağıdaki formu alır:

$$P(\lambda_0, t) = \frac{E_L}{\tau_L} \frac{A_0}{R_T^2} \xi(\lambda_0) \xi(R_T) \frac{\rho^s}{\pi} \exp\left(-2 \int_0^{R_T} \kappa(\lambda_0, R) dR\right) \quad (4.15.);$$

burada,  $\rho^s$  ile topografik hedefin saçma etkinliği verilmektedir ve  $R_T$  ile de bu hedefe mesafe verilmiştir.  $\rho^s$ 'nin değerleri görünür bölgede 0.1 ile kızıl ötesinde 1 aralığındadır.  $E_L$ , laser darbesinin çıkış enerjisidir ve  $\tau_L$  de darbenin süresidir.

Bu durumda alıcının integrasyon periyodu  $\tau_d$  içinde alınan enerjideki artış;

$$E(\lambda_0, R_T) = E_L \frac{A_0}{R_T^2} \xi(R_T) \frac{\rho^s \tau_d}{\pi \tau_L} \exp\left(-2 \int_0^{R_T} \kappa(\lambda_0, R) dR\right) \quad (4.16.);$$

dir ve  $\tau_d \leq \tau_L$ . Bunun tersine  $\tau_d > \tau_L$  olması durumunda,  $\tau_d / \tau_L$  faktörü birim ile değiştirilir. Ortamdaki güneş ışığının hedef üzerindeki aydınlatma etkisinin en uygun değerde tutulabilmesi için,  $\tau_d$  değeri,  $\tau_L$  değerine mümkün olduğunca yakın tutulmalıdır. Bilinen kirlilik yayan yerlerde, sistem duyarlılığını artırmak için bir retroreflektör kullanılabilir. Bu koşullar altında, eşitlik (4.16)'daki faktör  $\rho^s A_0 / \pi R_T^2$  yerine  $\xi_0$  (alıcı toplama etkinliği) kullanılır. Bu, mesafeye bağlı olarak bir kaç mertebe iyileştirme sağlayabilir.

DAS tekniğinde, ilgilenilen türlerden başka moleküllerin etkisi yok edilmek isteniyorsa, birbirine çok yakın iki laser dalga boyu kullanılmalıdır. Aynı sebeple, dağıtılmış saçıcı durumunda, laser ışını yolu boyunca ilgili maddenin yoğunluğunun integrali aşağıdaki şekilde yazılabilir;

$$\int_0^{R_T} N(R) dR = \frac{1}{2\sigma_A(\lambda_0 : \lambda_w)} \left[ \ln \left\{ \frac{E(\lambda_w, R_T)}{E(\lambda_0, R_T)} \right\} + \bar{\kappa}(\lambda_w, R_T) - \bar{\kappa}(\lambda_0, R_T) \right]$$

(4.17.);

Kirliliğin izlendiği bir çok durumda, ilgilenilen madde normalde atmosferde mevcuttur, bu nedenle de kirlilik aslında mevcut yoğunluğunun artırılmasıdır. Bu koşullar altında, kirliliğin salınmasından önce veya başka bir yerde bir ön ölçüm yapılmalıdır. Bu ikinci ölçüm ortam değerleri açısından referans olarak kullanılır ve daha sonra yapılacak ölçümlerden çıkarılarak gerçek değerler elde edilir.

Bu tür durumlarda, gönderilecek minimum enerji kriteri, soğurma kesit alanınının tepe değerine karşılık gelen laser dalga boyu ile çakışmaz. Bu durumda, optimizasyon açısından bir miktar sapma yapılabilir. Diğer taraftan, soğurmayı maksimuma getirecek şekilde bir dalga boyu seçilmesi de laser ışınının çok ciddi bir şekilde zayıflatılmasına da yol açabilir.

## 5 LIDAR EŞİTLİĞİNİN ÇÖZÜMÜ

Burada lidar eşitliği yeniden yazılacak ve değişik çözüm yöntemleri sunulacaktır.

$$P_{\text{total}}(r) = P(r) + P_{\text{bkg}} = \frac{E_0 \cdot C}{r^2} \cdot \beta(r) \cdot e^{-2 \int_0^r \sigma(r') dr'} + P_{\text{bkg}} \quad (5.1.);$$

$P_{\text{total}}(R)$ ; alıcıya gelen geri saçılan laser radyasyonu  $P(r)$  ile ortamda güneş kaynaklı bulunan radyasyon  $P_{\text{bkg}}$ 'nin toplamıdır.  $P(R)$ , veri sisteminde depolanan işarettir.  $P(R)$  için genişletilmiş formda,  $E_0$  gönderilen laser darbesinde başlangıçta taşınan enerjidir;  $C$  lidar sistem sabitidir, etkin teleskop alanı, laser darbe genişliği gibi faktörleri ve boyutsal süreklilik açısından gerekli tüm birimleri içerir;  $\beta(R)$  hacim geri saçılma katsayısıdır; ve  $\sigma(r)$  hacim yok olma (extinction) katsayısıdır.  $P(R)$ , lidardan  $R$  mesafesine karşılık gelen zamanın,  $t$ , kapalı bir fonksiyonudur, örneğin;  $R = R(t)$ .

Bu tartışmalar, geri saçılma kavramını ve işaretin atmosferde izlediği yol boyunca zayıflatılmasını gündeme getirmiştir. Bu zayıflatma, iki taraflı Beer-Bouguer-Lambert yasası ile açıklanır. Yukarıdaki lidar eşitliği:

$$P_r(r) = \frac{C_N \cdot E_0}{r^2} \cdot \exp \left\{ -2 \int_h^z \sigma(r') dr' \right\} \beta(r) + P_{bg} \quad (5.2.);$$

dir. Burada;

$h$  = lidarın yüksekliği

$P_r(r) = z$  (m) mesafesinden geriş dönen işaretin gücü

$\sigma(r)$  = atmosferik yok olma katsayısı ( $m^{-1}$ )

$\beta(r)$  = atmosferik geri saçılma katsayısı ( $m^{-1} sr^{-1}$ )

$P_{bg}$  = arkaplan (background) ışık gücü

$C_N E_0$  = sistem sabiti

Bu formülde çoklu saçılmanın ihmal edildiğine dikkat edilmelidir.

Bu eşitlikle ilgili önemli gözlem; sadece bir dalga boyu kullanılarak, geri saçılma ve yok olma katsayıları arasında bir ilişki varsayılmadığı sürece, lidar eşitliği çözülemez. Çoğunlukla,  $S_a(r) = \sigma(r) / \beta(r)$  kullanılır.  $S_a$  parçacık büyüklüğü ile ilgilidir. Bu varsayım ile, sadece bir tane bilinmeyen kalır ve eşitlik çözülebilir.

Bu basitleştirici varsayımla bile,  $S_a$  değerinin her yerde bilinmiyor olması belirsizliği söz konusudur. Geçtiğimiz 30 yıl boyunca, lidar eşitliğinin belirsizliğini gidermek üzere pek çok yöntem geliştirilmiştir.



## 5.1 Eğim Yöntemi

Teleskopdan dolayı lidar eşitliğinin kuvvetli bir  $r^{-2}$  bağıllığı olması nedeniyle, eşitlik (5.2) çoğunlukla aşağıdaki forma indirgenir:

$$\beta'(r) = C_N^{-1} \cdot E_0^{-1} \cdot (P_r(r) - P_{bg}) \cdot r^2 = \exp\left\{-2 \int_h^z \sigma(r') dr'\right\} \cdot \beta(r) = \beta(r) \cdot T^2(r)$$

(5.3.);

Eğer geri saçılmanın ve zayıflatmanın sabit olduğu bir bölge mevcutsa ( $z_{top} > r > z_{bottom}$ ), eşitlik 2.20'nin logaritması alınarak lidar eşitliği bir lineer regresyona indirgenebilir, ve işaretin aşağı doğru integrasyonu varsayılarak:

$$\ln(\beta'(r)) = \ln \beta(z_{top}) - 2 \left\{ \int_h^{z_{top}} \sigma(r') dr' \right\} - 2\sigma_{top} \cdot (z_{top} - r) = C_x + 2\sigma_{top} \cdot r$$

(5.4.);

burda  $\ln(\beta')$ 'ye karşı  $z$  grafiği çizilirse  $2\sigma_{top}$  eğimli bir doğru elde edilir.

İşaretin gücündeki değişme, zayıflatıcı elemanların optik derinliğinin bir ölçüsüdür ve zayıflatmanın bağımsız olarak incelenmesi için bir yol sunar. Bu yöntem, sıg fakat sirrus bulutları veya bulutsu tabakaları gibi optik açıdan kalın elemanlar için uygun olabilir. Uygulamada, çok fazla kullanım alanı yoktur çünkü, logaritmik eğrideki değişimi tespit için 10% doğruluk için  $\sigma$ ,  $0.2/\Delta z$  mertebesinde olmalıdır. 500 m kalınlığında bir tabaka için  $\sigma$ ,  $10^{-4} m^{-1}$  olmalıdır, bu da etkili bir aerosol bulutu için makuldur.

## 5.2 Russell Algoritması

1979'da Russell, Swissler ve McCormick, geri saçılmanın açığa çıkarılmasının analizi ve bunun hata analizini yayınladılar. Yöntemin temeli, model bir atmosfer seçilmesidir, bu modelde, yukarıda 5.3 eşitliğinde yapılan yok olmaya yapılan düzeltmeye bir ilk tahmin olarak beklenen mevsimsel veya yıllık aerosol ve gaz yok olma klimatolojilerini içerir. Bu teknik kullanılarak, iletimdeki düzeltme, bilinen klimatolojik iletim  $T_0$ 'dan bir pertürbasyon terimine,  $T'$ , dönüşür,

$$T^2 = T_0^2 \cdot T'^2 \quad (5.5.);$$

Klimatolojik terim,  $T_0$ , model atmosferden dolayı iyi bilinmesi gereken moleküler ve ozon iletim düzeltmeleri içerdiği için, pertürbasyon terimi,  $T'$ , daha çok aerosol yok olması kaynaklıdır. Eğer pertürbasyon terimi  $T'$  birim değere atmosferin temel iletiminden daha yakınsa, sabit geri saçılma yok olma oranı kullanma gibi sebeplerden gelen hatalar minimumda tutulabilir.

Bu tekniğin uygun bir şekilde kullanılabileceği durumlar sadece, pertürbasyonun küçük olmasının beklendiği durumlardır. Bu da, temiz kıtasal troposferik hava kütleleri için stratosferik aerosol tespitlerinde söz konusudur.

### 5.3 Fernald - Klett Çözümü

1979'da Fred Fernald, lidar eşitliğinin birinci dereceden bir Bernouilli eşitliği olduğunu farketti. Bu tür bir çözümde aşağıdaki form elde edilebilir:

$$\beta(r) = \frac{\beta'(r) \cdot \exp\left\{-2(S_a - S_m) \int_{z_c}^r \beta_m(r') dr'\right\}}{\frac{\beta'(z_c)}{\beta(z_c)} - 2S_a \cdot \int_{z_c}^r \beta'(r') \cdot \exp\left(-2(S_a - S_m) \cdot \int_{z_c}^{r'} \beta_m(r'') dr''\right) dr'}$$

(5.6)

burada  $S_m$  sabittir ve  $8\pi/3$ 'dir.

Bu çözüm "ileri" çözüm olarak anılmaktadır çünkü, önerilen çözüm, geri saçılma katsayısı ve yok olma-geri saçılma oranına referans kalibrasyon pozisyonu olarak geri getirme mesafesinden daha yakın bir pozisyon seçmektedir. Bu, yakın bölgede yok olma için yardımcı ölçümlerin (örneğin nephelometer) yapılabilirdiği durumlarda geçerliydi.

Klett (1981), Fernald çözümünün yüksek yok olma durumunda kararlı olmadığını ve  $r$  arttıkça birbirinden uzaklaşacağını gösterdi. Kendisi ters yönde bir çözüm önerdi, burada bilinen kalibrasyon pozisyonu gerçekleştirildiği bölgenin ötesindeydi:

$$\beta(r) = \frac{\beta'(r) \cdot \exp\left\{+ 2(S_a - S_m) \int_z^{z_c} \beta_m(r') dr'\right\}}{\frac{\beta'(z_c)}{\beta(z_c)} - 2S_a \cdot \int_{z_c}^z \beta'(r') \cdot \exp\left(- 2(S_a - S_m) \cdot \int_z^{z_c} \beta_m(r'' dr'')\right) dr'} \quad (5.7.);$$

Bu integrasyon sıralamalarının yeniden sıralanması ve paydaki işaret değişikliği çözümü daha karalı kılmıştır. Klett çözümünün dezavantajı, genellikle uzak mesafelerde yapılan ölçümler için kalibrasyon değerleri ile ilgili bilgi olmamasıdır. Bununla birlikte, uzaydan aşağı doğrultulmuş bir lidar sistemi ve bilinen yok olma ve aerosol bileşenleriyle yüzey kalibrasyon noktaları, Klett çözümünü iyi bir seçenek haline getirebilir.

## 5.4 Lidar Sistemleri ve Cihazları

### 5.4.1 Laserler

İlk lidarlarda monokromatik ve koherent enerji kaynağı olarak güçlü (darbe başına ~ 1 Joule) darbeleri ruby ya da neodymium glass laserleri kullanılırdı. Ruby ( $\lambda = 694.3$  nm) ve neodymium glass ( $\lambda = 1061$  nm) laserleri saniyede bir kaç darbe ile sınırlıydı, bununla birlikte, YAG (Yttrium Aluminum Garnet) laserleri 1065 nm dalgaboyunda ve saniyede bir kaç yüz darbe mertebesinde ve yeterli enerji seviyelerinde (darbe başına 0.1 J) darbeler üretebiliyordu, bu sayede de yüksek hızlı tarama için daha anlamlı bir çözüm sunuyordu. Diyot laserlerin kullanılması da elbette mümkündür. Örneğin, gallium arsenide ( $\lambda = 890$  nm) laserleri saniyede bir kaç yüz darbeyi güç seviyesi olarak bir kaç kilowatt mertebesinde sağlayabilmektedir. Günümüzde daha çok darbeleri solid state laserler kullanılmaktadır. Dalgaboyları ultra-viole (UV) ile yakın kızıl ötesi (IR) arasındadır. En çok kullanılan laserler; Nd:YAG ( $\lambda = 1064$  nm, genellikle ikinci (532 nm) ve/veya üçüncü (355 nm) harmonik üreteçleriyle kullanılır), Ruby ( $\lambda = 694$  nm), Alexandrite ( $\lambda = 701-818$  nm aralığında ayarlanabilir), Titanium: Sapphire ( $\lambda = 720-960$  nm) ve diyot ( $\lambda = 450-32000$  nm) laserlerdir. Darbe enerjisi ve tekrarlama oranı bir kaç kHz'de  $\mu$ J seviyesinden, 1-10 Hz'de 1-10 J aralığına kadar değişebilir.

Kısmen göz güvenliği, kısmen de yüksek güçlü darbeleri laserlerden daha ucuz çözümler üretmek için düşük güçlü sürekli dalga (continuous wave (cw)) gaz laserleri de lidar uygulamalarında kullanılmaktadır. Bu yaklaşımda, mesafe bilgisinin elde edilmesi için cw enerji karakteristik bir frekans değişimiyle (çoğunlukla testere dişi frekans modülasyonu (fm)) modüle edilerek elde edilir. Bu tür fm-cw sistemler 1 watt'ın oldukça küçük miktarı kadar güç seviyelerinde çalışırlar ve dolayısıyla göz açısından tamamen güvenlidir.

### 5.4.2 Alıcı:

Dönen ışığın toplanması için standart teleskoplar kullanılır. Lidar teleskopları tek lensli ve yüzey alanı  $0.01 \text{ m}^2$  olanlardan, çok aynalı ve yüzey alanı  $1-10 \text{ m}^2$  mertebesinde olanlara kadar değişebilir.

### 5.4.3 Bant-geçiren:

Ortam gürültüsü genellikle 1) interferans filtreleri (tipik bant genişliği  $\lambda = 0.1-10 \text{ nm}$ ), 2) monokromatör, 3) interferometreler; kullanılarak azaltılır.

### 5.4.4 Dedektör:

İşareti tespit etmek amacıyla çoğunlukla photomultiplier (PM) kullanılır. Bununla birlikte, avalanche photo diode (APD) da kullanılabilir. PM genellikle UV - görünür bölgede etkilidir, APD ise daha çok görünür bölge - IR için uygundur. Lidar dedektörleri için tipik kazanç ihtiyacı  $10^5-10^7$  mertebesinde dir.

### 5.4.5 İşaret İşleme:

Detektör tarafından üretilen elektrik işareti ya A/D dönüştürücüler tarafından dönüştürülür ya da foton sayma teknikleriyle ölçülür. İlk yöntem, işaretin yoğun



### 5.5.1 The Nd:YAG Laser

The neodymium: YAG (yttrium aluminum garnet) laser, bir kristal matrisi içindeki  $\text{Nd}^{3+}$  iyonlarını kullanan oldukça etkili bir solid state laserdir. Nd:YAG laser, pompalama için geniş bantlı flaş lambalarına izin veren geniş bantlı ve dört seviyeli bir laserdir. Üst laser geçiş bölgesi, uzun bir süreye sahiptir ve aşırı yoğunlaşmanın olmasına imkan tanır. Eğer kavite içine bir shutter yerleştirilirse, population inversion durumuna gelindiği halde laser yayımı engellenebilir. Lambanın pompalama kapasitesinin çoğu kullanıldığında shutter açılırsa, 10 ns darbe sürelili, mega watt gücünde ve 1064  $\mu\text{m}$  dalga boyunda dev bir darbe üretilir (Q-switch tekniği). Bu yolla, bir kaç on milijoule mertebesinde darbeler oluşturulabilir. Daha yüksek darbe enerjileri elde etmek için, ışın, içinde yarıçapı giderek artan laser çubukları bulunan flaş lambası tarafından pompalanan kuvvetlendiricilerin içinden geçirilir. Ticari olarak kullanılan lidar sistemlerinin Nd:YAG laserlerinde, bir veya iki kuvvetlendirici kullanılarak 1 J üzerinde enerjiler elde edilebilir. Tekrar oranları 10 – 30 Hz aralığındadır.

Faz-eşlemeli KDP (pottasium dihydrogen phosphate) kristalleri kullanılarak, etkili frekans çiftlemesi, üçlemesi ve dörtlemesi, 532, 355 veya 266 nm, elde edilebilir. Çiftlenmiş ve üçlenmiş çıktılar çoğunlukla DIAL uygulamalarında kullanılan dye laserdeki rhodamin ve coumarin dyelarının pompalanmasında kullanılır. Dörtlenmiş çıkış ise ozon lidar sistemleri için uygundur, çoğunlukla deuterium veya hydrogen'deki Raman saçılmasıyla 289 veya 299 nm çıkışlar üretmesiyle kullanılır.

### 5.5.2 Excimer Laser

Excimer laserler laser üretme ortamı olarak soy-gaz halojenitler kullanılır. Bu moleküller Ar, Kr veya Xe ile HCl veya HF karışımı içinde hızlı bir enerji boşalmasında uyarılmış halde elde edilebilirler. Temel seviye derhal ayrıştığından, excimer molekülleri laser ortamı olarak idealdirler. Lidar çerçevesi içinde, XeCl excimer laseri, 308 nm'de DIAL için kullanılan dye laserlerin pompalanmasında önemlidir.

Excimer laserler bir kaç yüz milijoule mertebesinde darbe enerjileri sağlarlar. En çok ilgi çeken özellikleri ise yüksek tekrar oranlarıdır (bir kaç yüz hertz mertebesinde). Diğer taraftan, çok çabuk bozunan ve zehirli olan gazların kullanılmasından dolayı çok dikkat gerektirir.

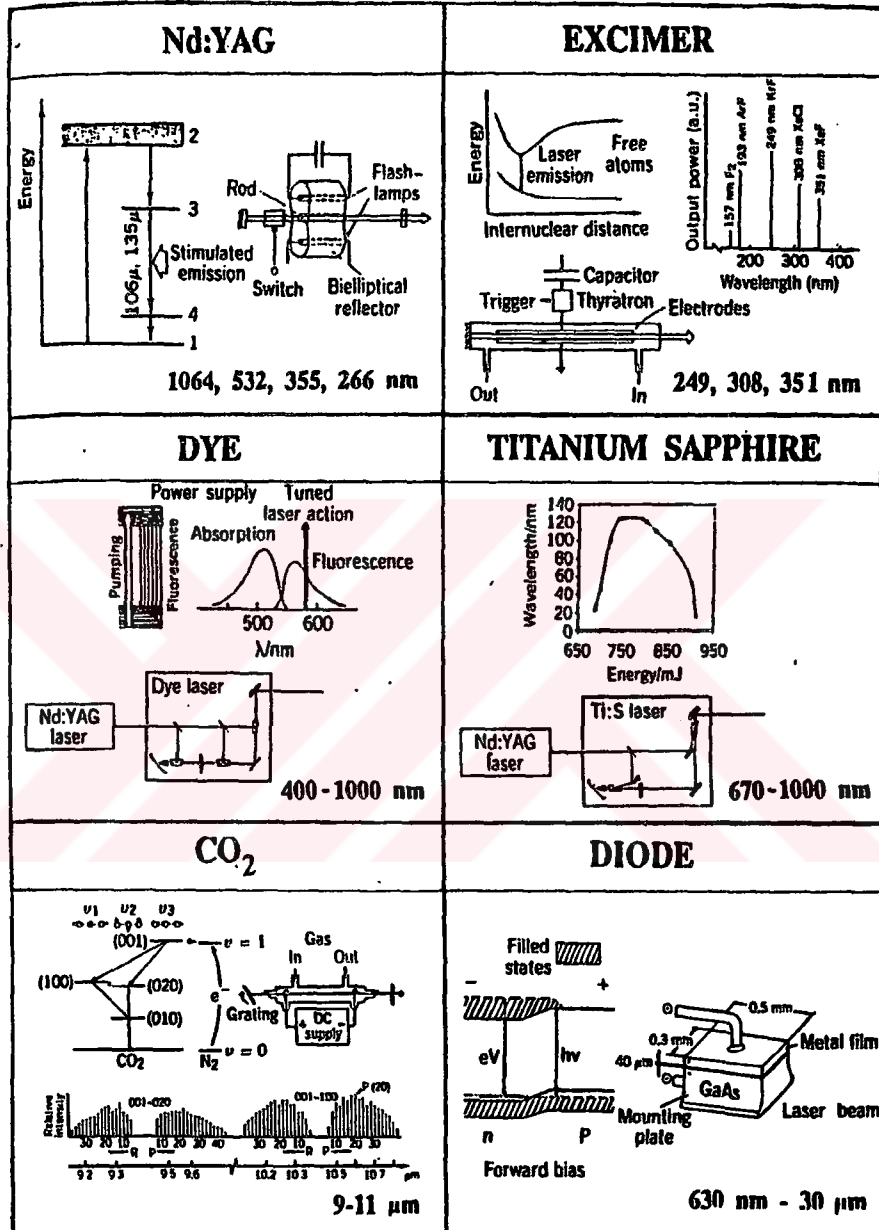
### 5.5.3 Dye Laser

Dye laserler uzun zamandan beri DIAL sistemlerinde standart olarak kullanılırlar. Aktif ortam metanol veya etanol içinde çözünmüş güçlü floresan etkisi olan dye molekülleri içerir. Geniş soğurma bandı, flaş lambası pompalaması için kullanılabilir ama daha çok Nd:YAG laser harmonikleri ya da bir XeCl excimer laser kullanılır. Yanıcı dye molekülleri üzerinde doğrudan flaş lambası kullanılmasının tehlikesinin yanında nispeten uzun olan darbeler de bu yöntemin az kullanılmasının nedenidir. Dye laser osilatöründe normalde bir grating ve bunun önünde de bant genişliğini azaltan bir ışın genişletici prizma kullanılır ayarlama amacıyla. DIAL için, birbirine yakın dalga boyları arasında geçiş çok önemlidir. Mekanik düzeneklerle bu ayarlamaları yapmak pratik değildir. Bunun yerine, çift-dalga boyu seçeneği daha çok kullanılır. Bir seçenek olarak, ışın ayırıcı (beam splitter) kullanarak ışının yarısı bir grating diğer yarısı da diğer grating üzerine yönlendirilebilir. Işınlara daha sonra

alternatif olarak bloklanarak kullanılırlar. Bir diğerk yöntem ise genişletilmiş ışınının yoluna iki tane grating yerleştirilmesidir. Gratingler önündeki yollar dönüşümlü olarak kapatılarak *on* ve *off* dalga boylarında darbeler gönderilebilir.

Uzun mesafeler için yeterli darbe enerjisi elde etmek için Şekil 5.1'de görüldüğü gibi osilatörden sonra bir veya iki kuvvetlendirici kullanılır. Çıkışı uygun darbe enerjilerine bölünmüş aynı pompa laseri, dye kuvvetlendiricileri pompalamak için de kullanılır. Rhodamine dye kullanılarak frekans çiftleme sonrasında 300 nm civarında SO<sub>2</sub> ve O<sub>3</sub> dalga boyları elde edilebilir. Yeşil Nd:YAG laser pomplaması kullanılarak dye için temel dalga boylarında 200 mJ'e kadar çıkış enerjisi elde edilebilir. Mavi ve yeşil dye'lar, üçlenmiş Nd:YAG laserin 355 nm'deki çıkışı tarafından veya doğrudan ve etkili bir şekilde XeCl excimer laser tarafından pomalanabilir. Bu yolla, NO<sub>2</sub> için 450 nm ya da NO ve Hg için frekans çiftleme sonrasında 226 ve 254 nm çıkışları üretilebilir.

## LASERS FOR DIAL



Şekil 5.1. DIAL ölçümleri için uygun 6 tip laser yapısı ve karakteristiği

### 5.5.4 Titanium-Sapphire Laser

Titanium-sapphire, yeni bir ayarlanabilir solid state laser materyalidir ve 670 nm ile 1  $\mu\text{m}$  aralığını kapsar. Üst seviye süresi (upper state lifetime) sadece 3  $\mu\text{s}$  olduğu için, kullanılabilir olmakla birlikte flaş lambası pompalaması pek uygun değildir. Çoğunlukla, pompalama için frekans çiftlenmiş Nd:YAG laser tercih edilir. Yüksek darbe enerjisi elde etmek için, sonu pompalanmış bir kuvvetlendirici katı kullanılır çoğunlukla. Frekans çiftlemesi yoluyla  $\text{NO}_2$  dalga boyları elde edilir;  $\text{SO}_2$ ,  $\text{O}_3$  ve Hg dalga boyları için frekans üçleme, NO dalga boyları için de frekans dörtleme gereklidir. Osilatör/kuvvetlendirici çıkışlarındaki darbe enerjileri dye laserleri için elde edilenlerle aynı mertebededir.

### 5.5.5 $\text{CO}_2$ Laser

Karbon dioksit laser, 9 – 12  $\mu\text{m}$  aralığında  $\text{CO}_2$  molekülünün değişik titreşimsel-döngüsel hatlarında enerji yayan bir gaz laseridir. Gaz deşarj tüpüne bir miktar nitrojen eklenir ve temel haldeki  $\text{CO}_2$  molekülleri ile titreşimsel olarak uyarılmış  $\text{N}_2$  molekülleri arasındaki çarpışmalar sayesinde pompalama elde edilmiş olur. Normal gaz basıncında, Doppler-genişlemesine uğramış hatlar sadece 50 MHz'de sınırlı bir ayarlamaya izin verir ve bu durumda ancak grating tarafından seçilen laser hatları ile moleküler soğurma hatlarının tesadüfi olarak çakışmasına güvenilebilir. IR bölgesindeki hatların zenginliğinden dolayı bir çok kirlilik kaynağına erişilebilir.

HF (hydrogen-fluoride) ve DF (deuterium-fluoride) laserleri de IR bölgesinde çalışan diğer gaz laserleridir. Bu laserler 2.7 – 3.0  $\mu\text{m}$  ile 3.7 – 4.0  $\mu\text{m}$  bölgelerini kapsarlar.

### 5.5.6 Diyot Laser

Diyot laser, çok küçük boyutları olan ve yüksek etkinlikli ayarlanabilir bir laserdir. İleri yönde kutuplanmış ve yüksek oranda katkılanmış bir p-n jonksiyonundan oluşur. Değişik materyaller için büyüklüğü farklı olan bant genişliğinde laser olayı gerçekleşir. Normalde, yarı iletken yüzeyinin parlatılması bir rezonatör oluşturur. Daha iyi bir kontrol için harici bir rezonatör kullanılır ve diyot yüzeyi yansımayı önleyici bir tabaka ile kaplanır. Darbeli diyot laserler belli yüksekliklerdeki bulutlar ve mesafe tayin edicilerde kullanılır.

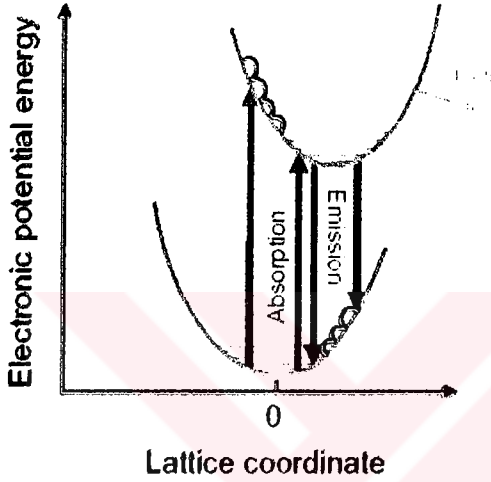


Çizelge 5.1: Laser tabanlı spektroskopik yöntemlerin karşılaştırılması

| Tip                                            | Prensip                                                          | Ölçülen                                    | Kullanıldığı alan                                        | Avantajları                                          | Dez-avantajları                                      |
|------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------|----------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|
| Laser absorption spectroscopy                  | Işığın rezonant soğurulması                                      | Gazlar & sıvılar                           | Miktarsal analiz, uzaktan algılama                       | Türe özel, geniş uygulama alanları                   | Dalga boyu ve yoğunluğun sabitlenmesinin gerek duyar |
| Laser-induced fluorescence                     | Rezonant soğurma tarafından doldurulmuş seviyeden ışık yayılması | Gazlar & sıvılar                           | Analitik spektrokimya, alev içindeki türlerin yoğunluğu  | Seçicilik, interferans düşüklüğü                     | Bir çok geçişin olduğu UV'de düşük laser çıkışı,     |
| Photo-ionization spectroscopy                  | İyonizasyon dengesindeki değişimin ölçülmesi                     | Gazlar                                     | Ultra-duyarlı tespit                                     | Çok düşük tespit sınırları                           | Pahalı ve karmaşık                                   |
| Photo-acoustic spectroscopy                    | Soğurulan ışık akustik enerjiye dönüştürülür                     | Gazlar, sıvılar, katılar                   | Analitik spektrokimya                                    | Basit ve duyarlı                                     | Örnek dedektör ile temas halinde olmalıdır           |
| Doppler-free spectroscopy                      | Bir ışın soğurmayı doyurur, ikinci ışın bunu izler               | Gazlar                                     | Çok yüksek çözünürlüklü spektroskopi                     | En yüksek spektral çözünürlük                        | Bir çok harici blesene ihtiyaç duyar                 |
| Laser-induced breakdown spectroscopy           | Laser ışık yayan bir sıcak plazma oluşturur                      | Parçacıklar, yüzeyler, sıvılar, gazlar     | Gerçek zamanlı spektrokimya                              | Minimum örnek hazırlığı                              | Potansiyel olarak zor kalibrasyon                    |
| Raman spectroscopy                             | Moleküler titreşimsel frekansların uyarılması                    | Moleküler gazlar, sıvılar, katılar         | Nadir türlerin tanımlanması                              | Türe özel, aynı anda bir çok türü tespit etme        | Ortam nedeniyle tespit eşiği yüksek olabilir         |
| Coherent anti-stokes Raman spectroscopy (CARS) | İki laser koherent olarak titreşimsel frekansları uyarır         | Moleküler gazlar, sıvılar, katılar         | Nadir türlerin tanımlanması, bileşim profili çıkarılması | Geleneksel Raman'a göre çok daha yüksek işaret       | Pahalı ve karmaşık                                   |
| UV resonance Raman spectroscopy                | Elektronik halden Raman saçılması                                | Moleküler gazlar, sıvılar, katılar         | Analitik kimya, uyarılmış hallerin yapısı ve dinamiği    | Kolayca taşınabilir                                  | Uygun UV laserlerin mevcudiyeti                      |
| Differential absorption lidar                  | Dağıtılmış geri yansıtıcılar kullanılarak soğurma spektroskopisi | Gazlar, aerosoller, atmosferik parçacıklar | Uzaktan algılama                                         | Uzaktaki örnekleri tek noktadan izlemeye imkan verir | Belki düşük işaret seviyeleri                        |

## 5.5.7 Titanium-Sapphire ve Dye Laserlerin Detaylı Karşılaştırması

### 5.5.7.1 Titanium Sapphire



TM iyon + host kristal:

- 3d elektronlarının kafes titreşimleriyle kuvvetli etkileşimleri (fononlar)
- Elektronik seviyelerin üzerinde geniş vibronik enerji bandı

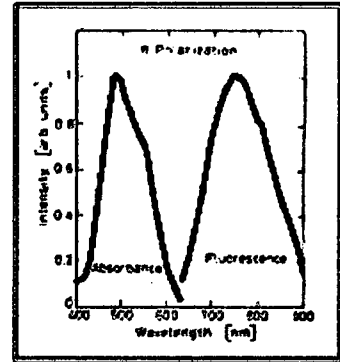
Şekil 5.2 Ti:Sapphire enerji seviyeleri

- Vibronik enerjinin banttan en alt seviyeye hızlı salınması
- Soğurma ve emisyon bantları oldukça ayırdır

Geniş Dalga boyu aralığında ayarlanabilir 4 seviyeli laser

Alexandrite laser ( $\text{BeAl}_2\text{O}_4$  kristali içinde  $\text{Cr}^{3+}$ )

Ti:Sapphire laser ( $\text{Al}_2\text{O}_3$  kristali içinde  $\text{Ti}^{3+}$ )



Şekil 5.3. Polarizasyon

### Titanyumun elektronik konfigürasyonu:

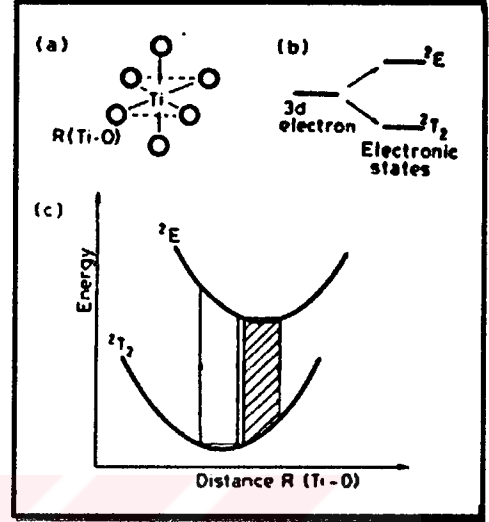
Ti: (Ar)3d<sup>2</sup>4s<sup>2</sup>

Ti: (Ar)3d<sup>1</sup>

### Laser kristali:

Ti<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (%0.1 -%0.5) Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (sapphir) içinde

(Ti<sup>3+</sup> → Al<sup>3+</sup>)



Şekil 5.4. Ti kristal yapısı

- $\tau \sim 3.2 \mu s$
- büyük uyarılmış emisyon kesit alanı
- bant genişliği kazancı  $\sim 100 \text{ THz}$  ( $\sim 150 \text{ nm}$ )
- dalga boyu ayarlanabilirliği  $\Delta\lambda$ :  $660 \text{ nm} - 180 \text{ nm}$

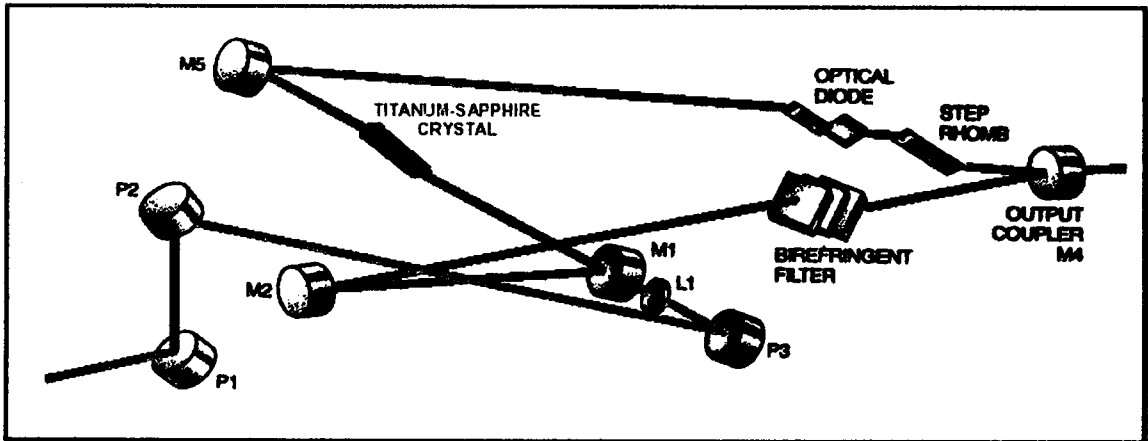
### CW Çalışma:

- Ar laser ile pompalama veya frekans çiftlenmiş diyot laser ile pompalanmış Nd:YAG
- $P_{cw} \rightarrow 50 - 100 \text{ W}$
- 100 fs darbeler için  $\sim 1 \text{ TW}$  (kaydedilen darbe genişliği  $\sim 5 \text{ fs}$ )

### Darbeli çalışma

- frekans çiftlenmiş Nd:YAG (veya flaş lambası) ile pompalanır

### Titanium Sapphire (cw) kavite konfigürasyon örneği

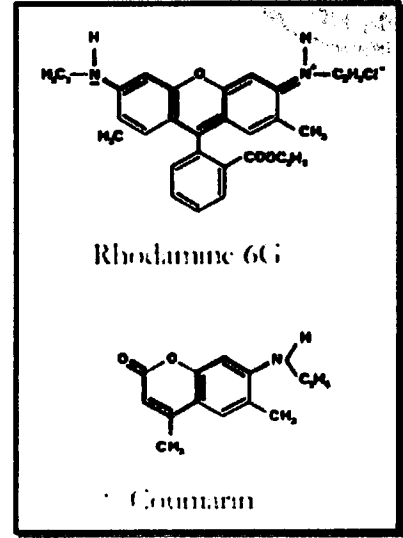


Şekil 5.5. Ayarlanabilir laser kaynağı olarak dye laserin kaldırılması kızıl ve yakın IR bölgede (660 – 1180 nm); frekans çiftleme: 335 nm – 525 nm

### 5.5.7.2 Dye Laser

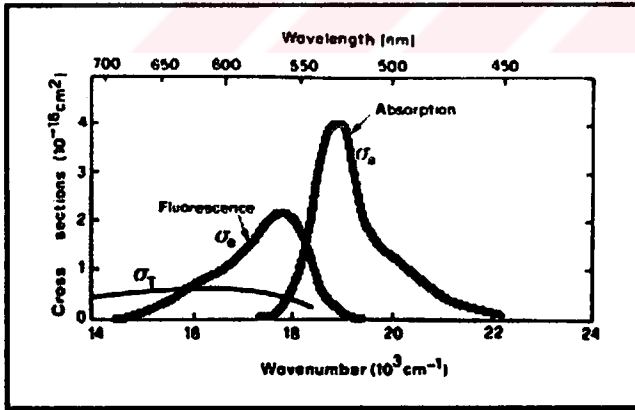
Aktif ortam: Sıvı bir çözücü içinde organik dye

Dye: Uzun konjuge çift bağ zincirleri içeren çok atomlu molekül



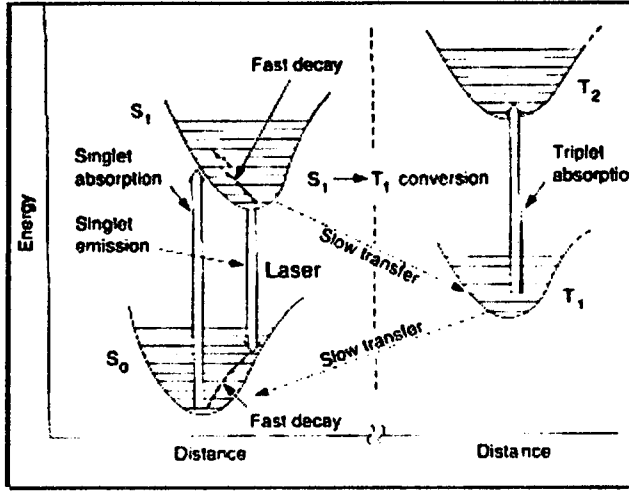
Çözücü: etil veya metil alkol, gliserol, su

Şekil 5.6. Molekül Yapısı



Şekil 5.7. Soğurma ve floresan bantları

## Dye İçin Enerji Seviyesi Yapısı



Şekil 5.8. Enerji seviyeleri

Mümkün geçişler:  $S_0 \leftrightarrow T_0$

$T_1 \leftrightarrow T_2$

$T_1$  seviyesinde çoğalma

⇒ üç kat soğurma

Sistem arası geçişler:  $S_1 \leftrightarrow T_1$

$\nu_{T_2 - T_1} \approx \nu_{laser}$

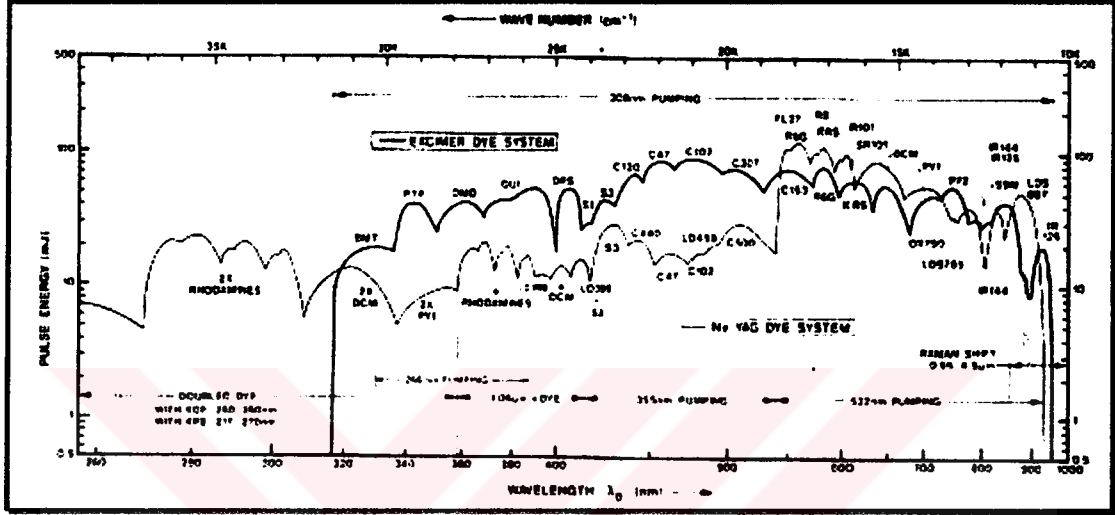
$T_1 \leftrightarrow S_0$



**KAYIP**

## Dye Laser Karakteristikleri

- Dalga boyu ayarlanabilirliği:  $\sim 30 - 50$  nm/dye
- Dye değiştirme yoluyla: görünür ve yakın IR bölgeleri kapsanır



şekil 5.9. Dye karakteristiği

### Problemler:

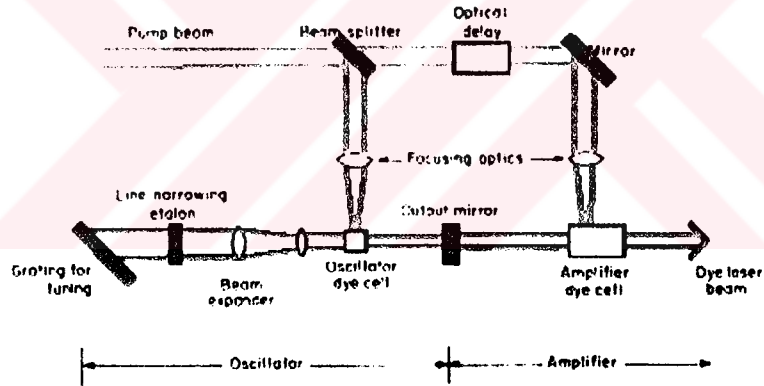
- Yüksek laser eşiği
- Sistem arası geçişler  $\Rightarrow$  cw çalışma zorluğu (jet-stream konfigürasyonuyla çözülebilir)
- Sıvı içindeki termal gradyanlar  $\Rightarrow$  kırılma indisi gradyanları



## Darbeli Çalışma

Pompa Kaynağı:

- Flaş lambası
  - Darbeli laser
    - ✓ Excimer laser, nitrojen laseri, bakır buharı şaseri
- veya frekans çiftlenmiş Q-switch Nd:YAG laser



Şekil 5.10. Darbeli çalışma için temel yapı



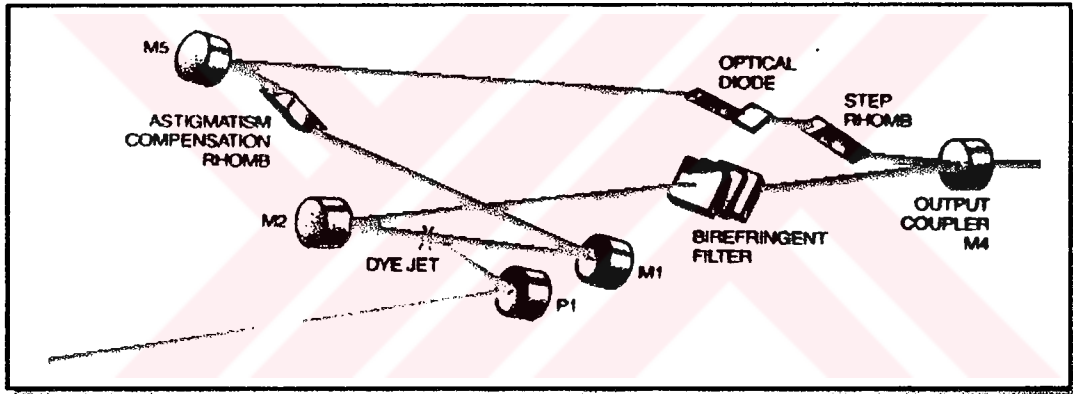
## CW Operation: Jet-stream dye laser

Kuvvetlendirme ortamı:

- ✓ İnce, açık bir jet akımı ( $\sim 100 - 200 \mu\text{m}$ )

Pompa kaynağı:

- ✓  $\text{Ar}^+$  ( $\text{Kr}^+$ ) laseri
- ✓ Diyot pompalı frekans .iftlemeli Nd:YAG laser (532 nm)



Şekil 5.11. Jet-stream dye laser



## **6 DIAL SİSTEMLERİNİN UYGULAMA ÖRNEKLERİ**

### **6.1 Kirlilik İzleme ve Meteorolojik Uygulamalar için Ti :Sapphire Dial Sistem**

Bu bölümde, Ti:Sapphire laseri pompalama için SHG Nd-YAG kullanılan mobil bir DIAL (Differential Absorption Lidar) sistemi anlatılacaktır. Ti:Sapphire ve Nd-YAG birlikte kullanılarak UV-VIS bölgesi (250-480nm) izlenebilmektedir ve bu bölge troposferik kirleticilerin izlenmesi için idealdir. IR bölgesi civarında (burada söz konusu olan 800-900 nm) su buharı profili incelenmiş ve tartışılmıştır [M. Dell’Aglia, A. Kholodnykh, R. Lassandro, O. De Pascale - 2001].

Havanın kalitesinin ve iklimsel etkilerin kontrolünde, atmosferdeki kirleticilerin ve aerosollerin izlenmesi belirleyicidir. Taşıt eksozlarından veya endüstriyel çıkıtlardan kaynaklanan antropojenik emisyonların günlük olarak miktarsal olarak izlenmesi ve bunların insan sağlığı üzerine etkilerinin belirlenmesiyle, VOC (volatile organic compounds), NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> gibi bir çok atmosferik kirleticinin günlük maruz kalılabilecek maksimum seviyelerinin belirlenmesi mümkündür. Bir çok hükümet, gelecekte öngördükleri indirimlere ulaşmak için kirleticilerin kabul edilen maksimum seviyelerini yayınlamışlardır. Aynı zamanda, meteoroloji, iklim ve global hidrolojik çevrimle ilgili olarak su buharının yüzeydeki değişiminin gözlenmesi önemlidir.

Örnek alma ve laboratuvarında inceleme şeklindeki kimyasal teknikler halen hava kirliliği kontrolünde en çok kullanılan yöntemler. Bununla birlikte bu teknikler, ilgilenilen yoğunlukların mesafenin bir fonksiyonu olarak sürekli olarak

ölçülebilmesi imkanını vermezler. Bu alanda, DIAL (Differential Absorption Lidar) gibi sistemler başarıyla kullanılmaktadır, bir çok kirlilik kaynağı molekülün iyi bir yüzeyssel çözünürlükle gerçek zamanlı olarak mesafeye bağlı yoğunlukları ölçülebilmektedir. Mobil DIAL sistemler kulanılarak analizlerin değişik bölgelerde yapılması da sağlanabilmektedir. Yüksek kaliteli solid-state ayarlanabilir laserlerin ve yüksek performanslı modern digitizer dedektörlerin geliştirilmesiyle LIDAR (Ligth Detection and Ranging) ölçümlerinin performansı da giderek artmaktadır.

DIAL tekniği, gazların spektral soğurma özelliklerine dayanır ve iki farklı dalga boyunda ayarlanabilen bir laser gerektirir. Tarihsel olarak, ilk ölçümler nem profiline daha sonra da NO<sub>2</sub> tespitine yönelikti. Bu öncü çalışmaların ardından, bir çok DIAL sistemi geliştirildi ve rutin ölçümlerde kullanıldı. Bu çalışmada anlatılan Ti:Sapphire DIAL sistemi, kirlilik tespiti ve meteorolojik uygulamalar için geliştirilmiştir.

### 6.1.1 Materyaller ve Metodlar

Atmosferik gazları izlemek için, iletimini engelleyecek temel atmosferik türlerin olduğu spektral bölgelerden kaçınmak önemlidir. UV-VIS spektral bölgesinde 240 nm'den büyük dalga boylarında soğurma özelliğine sahip bazı moleküller vardır ve bunlar kirlilik seviyelerinin belirlenmesi ve yönelimlerin tespiti açısından oldukça önemlidir.

DIAL tekniğinde, birbirine çok yakın bir çift dalga boyu ( $\lambda_{ON}$  ve  $\lambda_{OFF}$ ) kullanılır, bu dalga boyları için soğurma katsayısı farkı çok büyüktür. Laser ışığı atmosfere dönüşümlü olarak inceleme altındaki türlerin soğurduğu dalga boyu olan ( $\lambda_{ON}$ ) ve buna komşu olan ve soğurmanın olmadığı ( $\lambda_{OFF}$ ) dalga boyunda gönderilir. Daha sonra, alıcı sistem geri saçılan ışığı, mesafenin bir fonksiyonu olarak toplar. Eğer  $\lambda_{ON}$  ve  $\lambda_{OFF}$ , aynı saçılma özelliklerini göstermek açısından birbirine yeterince yakınsa, geri saçılan ışıkların güçleri oranı, mesafenin bir fonksiyonu olarak gaz yoğunluğunu tespit etmede kullanılabilir.

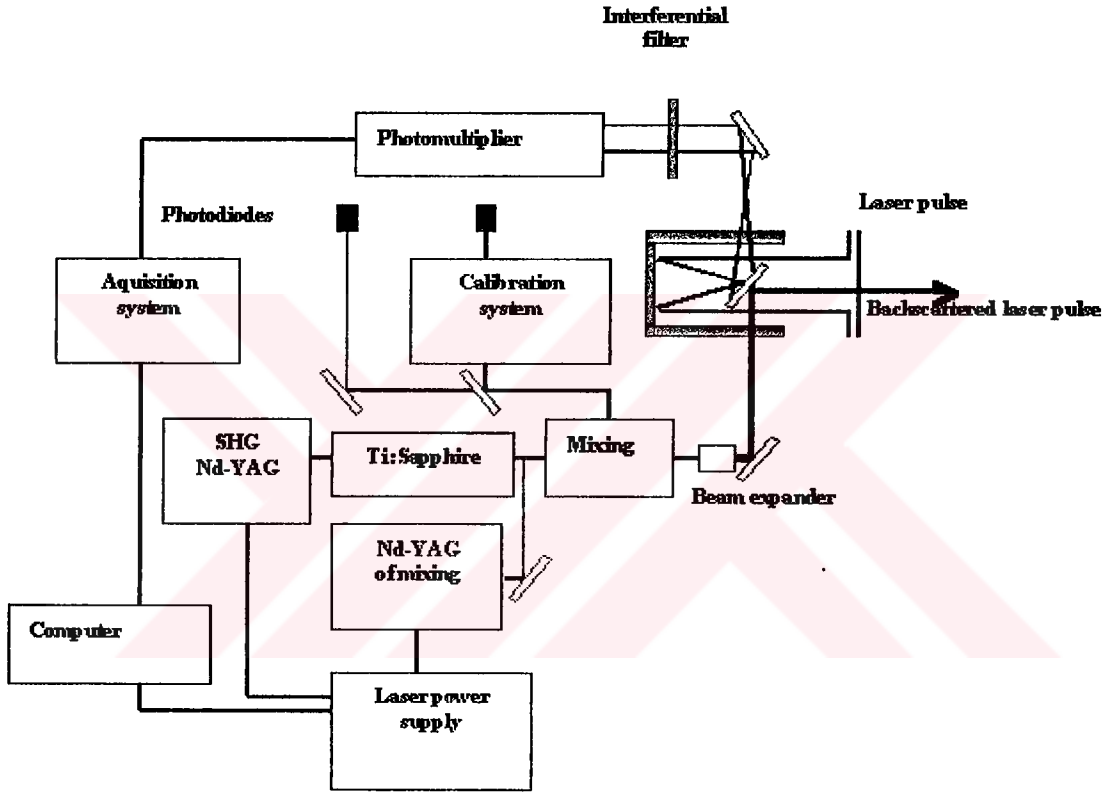
Burada anlatılan mobil DIAL sistemi,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{O}_3$ , benzene ve toluene yoğunluklarının mesafeye bağlı izlenmesi için tasarlanmıştır çünkü, bu moleküller UV-VIS bölgesinde interferansa sebep olmayacak şekilde soğurma bakımından tepe değerlere sahiptirler. Ayrıca bu bölgedeki büyük gaz soğurma genişliği sayesinde çok dar laser bant genişliği kullanılmasına gerek kalmamaktadır. Diğer taraftan, yakın IR bölgesinde su buharı profili ölçümleri için dar laser bant genişliği gerekmektedir. Bu deneyde kullanılan Ti:Sapphire bant genişliği, gaz kirleticilerin ölçümü ve su buharı profili için yeterince iyidir. Ti:Sapphire laserin seçilmesi, sürekli ve büyük bir dalga boyu aralığında kirleticilerin ölçülmesinden su buharı profili elde edilmesine kolay bir geçiş sağlamaktadır.

### 6.1.2 DeneySEL Kurulum

Kullanılan DIAL sisteminin şematik blok diyagramı Şekil 6.1'de verilmiştir.

Monostatik sistem bir alıcı bir de göndericiden oluşur: burada gönderici, SHG Nd:YAG ile pompalanan bir Ti:Sapphire laserdir (700-900nm), ikinci ve üçüncü harmonik üretimi ile 10 Hz'de çalışır, darbe süresi 10 nsec ve enerjisi de 800 nm'de 100 mJ'e kadardır. Ti:Sapphire konfigürasyonu, bir osilatör ve uzunlamasına pompalanan iki adımlı bir kuvvetlendiriciden oluşur. Laserin ayarlanması, eğim vidasıyla bir mikro-adım motoruna bağlı dönüşü bilgisayar tarafından kontrol edilen sinüs bar üzerindeki kırılma ayarlayıcı (diffraction grating) tarafından gerçekleştirilir.  $\lambda_{\text{on}}-\lambda_{\text{off}}$  arasındaki hızlı geçiş, sinüs bar üzerine yerleştirilmiş motorlu bir eksenel kam (eccentric cam) yardımıyla gerçekleştirilir. Eksenel kam, sinüs barı laser frekansında hareket ettirir, bu da grating'in iki dalga boyuna karşılık gelen pozisyonlara dönüşümlü olarak gelmesini sağlar. İki tane soğutucu kullanılarak laser optik elemanlarının stabil kalması sağlanmıştır. Laser sistemi aynı zamanda UV ve görünür bölgelerde de (250-480nm) ışın yayar, bunun için galvanometre üzerine yerleştirilmiş BBO kristalleri ile Nd-YAG laseri birlikte kullanılmaktadır (SHG-Ti:Sapphire + Nd-YAG; Ti:Sapphire + Nd-YAG). Her kristal belirli  $\lambda_{\text{ON}}$  and  $\lambda_{\text{OFF}}$

dalga boylarında optimum çalışacak şekilde ayarlanmıştır. Tipik çıkış enerjisi 450 nm bölgesinde 20 mJ; ve 300 nm bölgesinde de 2-5 mJ'dür. Çizelge 6.1'de gerçek dalga boyları, ihtiyaç duyulan temel dalga boyları ve kirleticiler için kullanılan karıştırma işlemleri verilmiştir.



Şekil 6.1. DIAL sistemi blok diyagramı

Çizelge 6.1. Kirletici dalga boyları ve karıştırma süreçleri

|                 | $\lambda_{ON}$<br>(nm) | $\lambda_{OFF}$<br>(nm) | $\lambda_{ON}$<br>Ti:sapph. | $\lambda_{OFF}$<br>Ti:sapph. | BBO 1    | BBO 2   |
|-----------------|------------------------|-------------------------|-----------------------------|------------------------------|----------|---------|
| O <sub>3</sub>  | 282.00                 | 287.00                  | 767.38                      | 786.00                       | SH Tit.  | SH+YAG  |
| SO <sub>2</sub> | 300.05                 | 299.51.                 | 835.80                      | 833.70                       | SH tit.  | SH+YAG  |
| NO <sub>2</sub> | 448.25                 | 446.83                  | 774.56                      | 770.33                       | Tit.+YAG | /       |
| Benzene         | 252.90                 | 252.00                  | 758.70                      | 756.00                       | SH Tit.  | TH Tit. |
| Toluene         | 266.90                 | 266.10                  | 798.90                      | 798.30                       | SH Tit.  | TH Tit. |

Laser ışınları atmosfere teleskop eksenine paralel olarak gönderilir. Göndericideki son sağ açılı quartz prizma (UV'de antireflection kaplıdır) teleskopun içindedir ve prizmaları uygun bir şekilde hareket ettirmeyi sağlayan iki tane adımli-motor tarafından sürülür.

Dalga boyunun kalibrasyonu ve doğru  $\lambda_{ON}$  ve  $\lambda_{OFF}$  dalga boylarının seçilmesi için, yoğunluğu bilinen bir gaz ile doldurulan kalibrasyon hücreleri kullanılır. Laser ışınının küçük bir kısmı iki fotodiyotun gaz iletiminin tepe noktalarını açığa çıkardığı hücreye doğrultulur: aynı zamanda laser ışını ayarlayarak, ilgilenilen gaz için dalga boylarını seçmek ve diferansiyel soğurma katsayısını hesaplamak mümkündür. Bu işlerin kontrolünde National Instruments Labview yazılımı kullanılmıştır.



Alıcı sistem, bir Newtonian teleskop ( $\lambda = 600$  mm,  $f = 1600$  mm, görüş alanı = 1 mrad) ve teleskop tarafından odaklanan geri saçılmış işareti toplayan bir fotoçarpıcıdan (photomultiplier) (IIAMAMATSU Mod.R1668) oluşur. Çıkış elektrik işareti, kuvvetlendirilir ve 10 Ms/sec transient recorder (GAGE) tarafından 12 bit çözünürlükle dijitalize edilir.

Güneş kaynaklı ortam radyasyonunun etkisini yok etmek için kullanılan interferans filtreleri aşağıda Tablo 6.2'de verilmiştir. Fotoçarpıcı ve hücrelerden önce, ilgilenilen interferans filtresini seçmek için iki tane motorlu tekerlek mevcuttur.

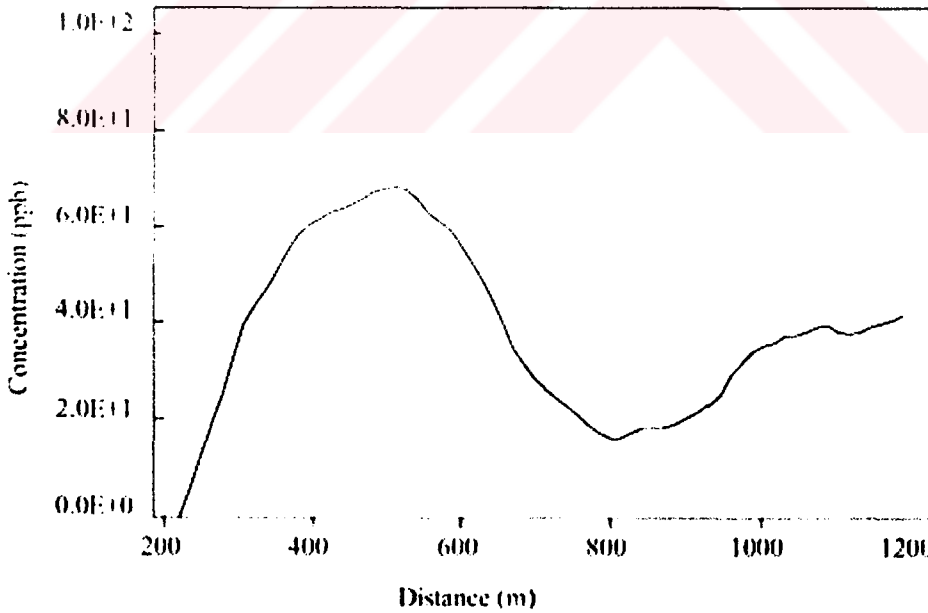
Çizelge 6.2. Interferans için filtre özellikleri

|                        | SO <sub>2</sub> | NO <sub>2</sub> | O <sub>3</sub> | Toluene<br>& Benzene |
|------------------------|-----------------|-----------------|----------------|----------------------|
| Merkez dalga boyu (nm) | 300± 5          | 447.3± 0.4      | 284± 3         | 259.5± 1             |
| Bant genişliği (nm)    | 5± 0.5          | 3± 0.5          | 15± 1          | 20± 1                |
| Reddetme (340-930nm)   | 5               | 5               | 5              | 5                    |
| İletim                 | >20%            | >40%            | >20%           | >18%                 |

Teleskop, bilgisayar kontrollü adımlı motorlar ve geri besleme çevrimi üzerinden teleskoba pozisyonunu veren potansiyometreler kullanılarak azimuth ( $512.0^\circ \pm 0.25^\circ$ ) ve zenith ( $204.0^\circ \pm 0.1^\circ$ ) doğrultularında hareket ettirilebilir. Laser sistemi ve teleskobun monte edildiği tüm platform, hidrolik bir sistem yardımıyla mobil laboratuvar üzerinde kaldırılabilir.

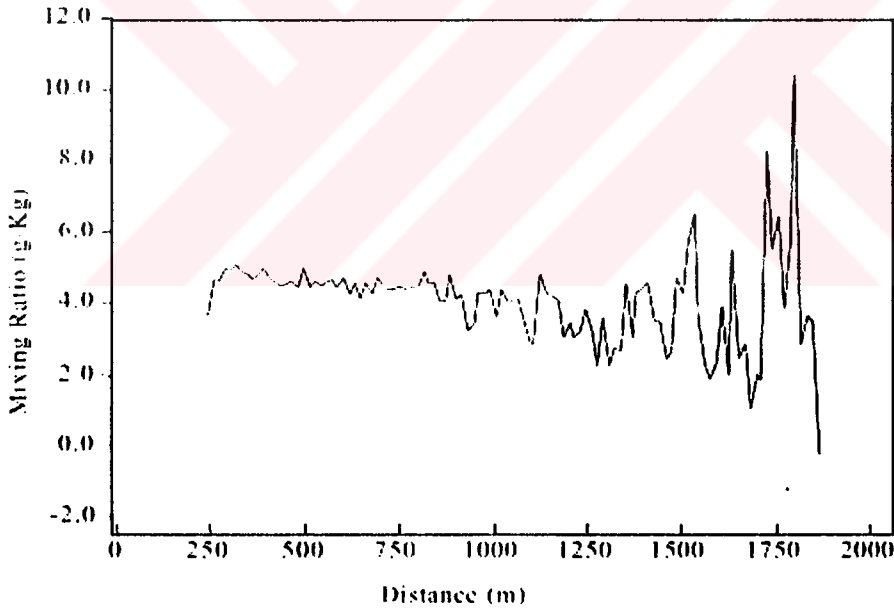
### 6.1.3 Sonuçlar

Tanımlanan sistemin güvenilirliğini test etmek için,  $\text{NO}_2$  ve su buharı ölçümleri gerçekleştirildi. Nitrojen dioksit, yüksek sıcaklıklı yanma işlemi sonucunda oluşur bu nedenle de genel olarak endüstriyel çalışmalar ve trafik sonucunda oluştuğı söylenebilir. Kısaca, yanma işlemi süresince, atmosfere NO yayılır, daha sonra bu molekül okside olarak  $\text{NO}_2$  oluşur ve daha sonra da toprağın ve suyun asidize olmasına sebep olan  $\text{HNO}_3$  oluşur. Dahası,  $\text{NO}_2$  fotolizi, troposferik ozonun en önemli sebeplerindendir. Şekil 6.2'de (Labview ekranı) şehrin bir caddesindeki (Castellana Grotte - Puglia - Italy)  $\text{NO}_2$  yoğunluğu gösterilmiştir ve ölçüm için yatay bir yol kullanılmıştır. En büyük yoğunluk tepe değeri, 240 m çözünürlükte, 500 m'de  $65 \pm 15$  ppb'dir ve 11.30'da (yoğun sabah trafiğı 8.00'da gerçekleştikten sonra) elde edilmiştir. Bu değeri hava kirliliğı bakımından düşük seviye olarak kabul edilmiştir (UK National Air Quality Information Archive).



Şekil 6.2. Kırsal bölgede  $\lambda_{\text{ON}} = 448.25\text{nm}$  ve  $\lambda_{\text{ON}} = 446.83\text{nm}$ 'de  $\text{NO}_2$  için Lidar işaretleri

Yoğunluktaki tahmini hata,  $\lambda_{OFF} = \lambda_{ON}$  durumunda işaretlerin tespit edilmesiyle hesaplanmıştır. Minimum tespit edilebilir yoğunluk, 240 m çözünürlükte, 28 ppb'dir ve deneysel maksimum SNR  $200 \pm 15$ 'dir. Su buharı ölçümüne geçmek için, Ti:Sapphire kuvvetlendirilmesinden sonra bir prizma yerleştirilir, böylece, kuvvetlendirilen Ti:Sapphire laser ışını karışma bölgesinden geçmeksizin doğrudan atmosfere yönlendirilir. Şekil 6.3'de (Labview ekranı) su buharı profili gösterilmiştir;  $\lambda_{ON} = 829.02$  nm ve  $\lambda_{OFF} = 828.62$  nm, 1000 ölçüm, yatay yol, 240 m çözünürlük. Mesafe ölçümleri bu ölçümde 1.5 Km'ye kadardır. 1000 m'den sonra mesafeyle daha da düşen bir SNR ölçümleri etkilemiştir; mesafeyle yoğunluktaki dalgalanmaların artışı not edilmiştir. Bu su buharı soğurma profili için, diferansiyel soğurma katsayısı ( $0.0023 \text{ atm}^{-1} \text{ cm}^{-1}$ ) hesapları, HITRAN veritabanı kullanılarak yapılmıştır.



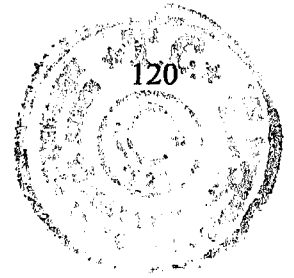
Şekil 6.3 Kırsal alanda su buharı karışma oranı

## 7 SONUÇ

Bu çalışma kapsamında, uzaktan algılama sistemlerinin bir çeşidi olan Lidar tekniği incelenmiştir. Lidar tekniğinin özel bir şekli olan DIAL tekniğinin diğer tekniklere göre en önemli avantajı olan oranlama sayesinde, bilinmeyen olarak eşitliklerde gözüken ve belirsizliğe sebep olan parametrelerin sadeleşmesi ve bu şekilde daha basit bir formül elde edilmesi vurgulanmıştır. Lidar eşitliği için çeşitli çözüm önerileri incelenmiş, Fernald Klett tarafından önerilen ve en çok kullanılan çözüm açıklanmıştır. DIAL sistemlerin en çok ihtiyaç duyduğu özellik ayarlanabilir laserdir. Bu konuda oldukça uygun özelliklere sahip olan Ti:Sapphire laser tercih edilmiştir. Birbirine çok yakın ikli dalga boyunda çalışabilecek şekilde ayarlanabildiği gibi geniş bir aralıkta da kolayca ayarlanabildiği için ve ayrıca taşınabilir sistemlerin tasarımına da elverişli olduğu için Ti:Sp laser DIAL uygulamalarında sıklıkla tercih edilmektedir. Çalışmanın başlangıcında NO<sub>2</sub> için DIAL ölçümleri yapılması planlanmış ancak çeşitli imkansızlıklar neticesinde bu ölçümler gerçekleştirilememiştir. Çalışmanın sonunda bir uygulama örneği verilmiş ve burada teorik olarak önerilen sisteme ilişkin avantajların gerçek ölçümlerde de elde edilebildiği gözlenmiştir.

Sonuç olarak DIAL tekniği, özellikle atmosferdeki kirliliğin tespiti amaçlı çalışmalarda, bir çok diğer alternatifine göre avantajlı olan uygun ve kolayca uygulanabilir bir çözümdür.

## KAYNAKLAR



1. University Corporation for Atmospheric Research, <http://www.ucar.edu/ucar/>
2. "What is air pollution?"; King's College London  
<http://www.erg.kcl.ac.uk/london/asp/information.asp?view=whatis>
3. Environmental Chemistry; Alan Winfield – Cambridge University Press
4. Air Quality Guidelines; WHO, 1999
5. Air Pollution, Fact Sheet No: 187; WHO
6. Airborne Instrumentations for Aerosol Measurements; Leopoldo Stefanotti, Stefan Borrmann
7. Topics in Applied Physics, Volume 14- Laser Monitoring of the Atmosphere; Editor: E.D. Hinkley
8. Dr. Irina N. Sokolik Home Page <http://irina.colorado.edu/>
9. Laser Remote Sensing – Fundamentals and Applications; Raymond M. Measures
10. Air Monitoring by Spectroscopic Technics; Marcus W. Sigrist
11. NCRST-E Air Quality Project Year 1 Final Report 2001 – Waheed Uddin -The University of Mississippi
12. Development of a Ti:Sapphire Dial System for Pollutant Monitoring and Meteorological Applications - M. Dell'Aglio, O. De Pascale, A. Kholodnykh, R. Lassandro, 2001
13. PICASO-CENA (Pathfinder Instruments for Cloud and Aerosol Space borne Observations) LIDAR White Papers
14. Efficient Third Harmonic Generation with a Ti:Sapphire Laser – Alex Yu. Dergachev, Bhabana Pati and Peter F. Moulton



15. Lidar Measurement of Particles and Gases by Elastic Backscattering and Differential Absorption; R. T. H. Collins, P. B. Russell
16. Techniques for Detection of Molecular Pollutants by Absorption of Laser Radiation; E. D. Hinkley; R. T. Ku; P. L. Kelley
17. Optikal and Laser Remote Sensing; D. K. Killinger, A. Mooradian, 1983
18. The Laser as a Tool in Environmental Problems; F. Molero, F. Jaque
19. Klett Inversion of Simulated Lidar Signals; John A. J. Matthews, 2001
20. Atmospheric Backscatter and Lidars; G. P. Gobbi, F. Barnaba, 2002
21. An Ozone DIAL Receiver System for Use on Unpiloted Atmospheric Vehicles; S. Goldsmith, R. J. DeYoung; NASA/TM-1999-209716



# ÖZGEÇMİŞ



**Model Bilgi İşlem - Microsoft Çözüm Ortağı (Ekim 1997 - Şubat 1998)**

Access Veritabanı Geliştirici

**Unilever (Şubat 1998 - Ekim 1998)**

Y2K Projesi İdarecisi

**Unilever (Kasım 1998 - Nisan 1999)**

Otomasyon Sistemleri Kontrolörü

**Alcatel (Eylül 1999 - Haziran 2000)**

Stajer Mikroelektronik Tasarımcı - FSK Demodülator Tasarımı

**Alcatel (Mart 2001 - Şubat 2002)**

Mikroelektronik Tasarımcı - Wireless LAN Tasarımı

**Alcatel (Şubat 2002 - )**

GSM Bölümü - GPRS Uzmanı

## **Eğitim**

İTÜ Elektrik-Elektronik Fakültesi Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği (2000)

GYTE Elektronik Mühendisliği - Yüksek Lisans

## **Yabancı Diller**

İngilizce (Çok iyi), Almanca (temel seviye)