

T.C.

GEBZE YÜKSEK TEKNOLOJİ ENSTİTÜSÜ

**MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ
ENSTİTÜSÜ**

**GEBZE ÇEVRESİNDEKİ AEROSOL
FORMUNDAKİ HAVA KİRLİLİĞİNİN
RAMAN LİDARI İLE İNCELENMESİ**

Alper SEÇGİN

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ

GEBZE

2012

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

GEBZE ÇEVRESİNDEKİ AEROSOL
FORMUNDAKİ HAVA KİRLİLİĞİNİN
RAMAN LİDARI İLE İNCELENMESİ

Alper SEÇGİN

YÜKSEK LİSANS TEZİ
ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ

DANIŞMANI

Prof. Dr. Anatoli DIMOGLO

GEBZE

2012



YÜKSEK LİSANS TEZİ JÜRİ ONAY SAYFASI

G.Y.T.E. Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 24/05/2012 tarih ve 2012/19 sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından 31/05/2012 tarihinde tez savunma sınavı yapılan Alper SEÇGİN'in tez çalışması Çevre Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS tezi olarak kabul edilmiştir.

JÜRİ

ÜYE

(TEZ DANIŞMANI) : Prof. Dr. Anatoli DIMOGLO

ÜYE

: Prof. Dr. Faik MİKAİLZADE

ÜYE

: Yrd. Doç. Dr. Pınar ERGENEKON

ONAY

G.Y.T.E. Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun
...../...../20... tarih ve/..... sayılı kararı.

İMZA/MÜHÜR

ÖZET

TEZİN BAŞLIĞI: GEBZE ÇEVRESİNDEKİ AEROSOL FORMUNDAKİ HAVA KİRLİLİĞİNİN RAMAN LİDARI İLE İNCELENMESİ

YAZAR ADI : ALPER SEÇGİN

Aerosoller, zamana ve yere göre değişiklik gösterebilen, bulut mikrofiziğine (ışınım salımsal özelliğini etkileyerek) ve iklim değışikliklerine sebep olan, iklim modellemedeki en önemli belirsizlik faktörüdür. Aerosoller, sahip oldukları belirli hacim ve kütle sebebiyle yeryüzüne gelen güneş ışığını soğurarak veya geri saçılımına sebep olarak direkt ve dolaylı etkileri ile küresel enerjiye tesir etmektedir. Özellikle sanayileşme ve kentleşmenin de artması ile atmosferdeki aerosol varlığı da artış göstermektedir. Atmosferde oluşturdukları kirlilik nedeniyle aerosollerin, insan sağlığı üzerinde olumsuz etkilerinin bulunduğu gözlemlenmektedir. Ülkemizde Kocaeli iline bağlı Gebze ve Dilovası ilçeleri, sahip oldukları fabrikalar, organize sanayi bölgeleri, kara ve deniz yolları ile yoğun kirliliğin oluştuğu bir bölgedir. Özellikle Dilovası bölgesi kanser vakalarının en çok görüldüğü ilçemizdir.

Bu çalışmada, Gebze ve civarı bölgelerdeki atmosferik aerosollerin incelenmesi amacıyla, bir uzaktan algılama tekniğı olan Lidar yöntemi kullanılmıştır. TÜBİTAK MAM'da tasarlanan ve geliştirilen çok dalga boylu lidar sistemi kullanılarak çeşitli dalga boylarındaki lazer ışıklarından, ışın azalımı ve geri saçılımın renk haritaları çıkartılarak Gebze ve civarı bölgelerdeki aerosol bulutlarının konumsal dağılımlarının tespiti gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada kullanılan lidar sistemi ile yapılan ölçümler neticesinde, söz konusu bölgedeki aerosollerin mikrofiziksel özelliklerinin tespiti ileride gerçekleştirilebilecektir.

SUMMARY

**THESIS TITLE : INVESTIGATION OF AIR POLLUTION IN AEROSOL
FORM AROUND GEBZE WITH RAMAN LIDAR**

AUTHOR : ALPER SEÇGİN

Aerosols varying by time and place are the most important uncertainty factors in climate modelling. They cause cloud microphysic by effecting radiative property and climate change. The aerosols influence global energy with their direct and indirect effects since aerosols having definite volume and mass absorb or backscatter solar light. The amount of aerosols in atmosphere increases depending on the increases in industrialization and urbanization. Moreover, the aerosol pollution in atmosphere threaten human health. The presence of factories, organized industrial zones, overlands and seaways in Gebze and Dilovası districts (in Kocaeli, Turkey) cause pollution. It is observed that cancer cases are mostly seen in Dilovası region.

In this study, Lidar technique which is the remote sensing method in order to investigate the atmospheric aerosols was used. This Lidar system designed and developed in TUBITAK MRC was employed in order to determine the aerosol cloud distrubition in Gebze and adjacent regions by achieving color maps of radiation extinction and backscattering in terms of multiwavelength laser radiation. Microphysical parameters of these aerosols in the stated regions will be determined in the future due to the measurements performed by using this Lidar system.

TEŞEKKÜR

Çalışmalarında beni yönlendiren ve her aşamasında emeği geçen danışmanım Prof. Dr. Anatoli DIMOGLO ile TÜBİTAK MAM Malzeme Enstitüsünde birlikte çalışmakta olduğum, proje yürütücüm Prof. Dr. Kerim ALLAHVERDİ' ye; proje ve laboratuvar çalışmaları ile tez çalışmalarım için yapmış olduğum ölçümlmeler esnasında yardım ve desteklerini esirgemeyen çalışma arkadaşlarım Dr. Zehra ALLAHVERDİ ve Dr. Mehmet Fatih HÜSEYİNOĞLU' na; TÜBİTAK MAM Malzeme Enstitüsü proje grubu arkadaşlarım Özgür Can TATAROĞLU, Nurullah AĞCA ve Kayhan ÖNER' e teşekkürlerimi sunarım.

Her zaman maddi ve manevi yanımda olarak bugünlerime gelmemi sağlayan annem Sevgi SEÇGİN ve babam Muzaffer SEÇGİN'e; destekleri için abim İlker SEÇGİN ve eşi Özlem SEÇGİN' e; özellikle her zaman koşulsuz desteği ile arkamda duran, yüksek lisans ders ve tez aşamalarım süresince sabrını, anlayışını ve şefkatini esirgemeyen sevgili eşim Gizem OKTAY SEÇGİN'e minnetlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	iv
SUMMARY	v
TEŞEKKÜR	vi
İÇİNDEKİLER DİZİNİ	vii
SİMGELER ve KISALTMALAR	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	xi
ÇİZELGELER DİZİNİ	xiii
GİRİŞ	1
2. ATMOSFERİK AEROSOLLER VE LİDARLA TESPİTİ	6
2.1 Aerosollerin Çeşitlerine Göre Sınıflandırılması	6
2.1.1 Denizel Aerosoller	7
2.1.2 Toprak Tozu Aerosoller	9
2.1.3 İkincil Aerosoller	11
2.1.4 Organik Aerosoller	12
2.1.5 Volkanik Aerosoller	13
2.1.6 Antropojenik Aerosoller	14
2.2 Aerosollerin Çevresel Etkileri	15
2.2.1 Aerosollerin İnsan Sağlığına Etkileri	17
2.2.2 Aerosollerin Optik Özellikleri ve Atmosferdeki Etkileri	19
2.2.2.1 Aerosol Geri Saçılması	19
2.2.2.2 Aerosol Soğurulması	19
2.2.2.3 Aerosol Doğrudan Etkisi	20
2.2.2.4 Aerosollerin Dolaylı Etkileri	21
2.3 Aerosollerin Mikrofiziksel Özellikleri	22
2.3.1 Sayı Yoğunluğu	22
2.3.2 Yüzey Alanı Yoğunluğu	23
2.3.3 Hacim Yoğunluğu	24
2.3.4 Efektif Yarıçap	24
2.3.5 Polarizasyon	24
2.3.6 Kırınım İndisi	25

2.4	Aerosollerin Lidar ile Tespit ve Teşhisi	26
2.4.1	Lidar' ın Tanımı	26
2.4.2	Lidar Temelleri	26
2.4.3	Temel Lidar Çalışma Prensipleri	28
2.4.4	Lidar ile Yapılan Aerosol Çalışmaları	30
2.4.5	Dünyadaki Lidar Ağları	32
2.5	Gebze Bölgesi Coğrafi Konular ve Kirleticiler	33
3.	MATERYAL VE METOT	37
3.1	Aerosol Saçılım Katsayıları ve Lidar Denklemi	37
3.2	Lidar Denkleminin Çözümü	39
3.2.1	Düzenleme ile Tersine Çevirme	41
3.3	Lidar Tasarımı, Geliştirilmesi ve Yerleştirilmesi	48
3.3.1	Lidar Teknik Özellikleri	52
3.3.2	Ölçümleme Metodu	52
4.	BULGULAR VE TARTIŞMA	55
4.1	Bulgular: Ham Sinyal Verilerinden Bilgiye Ulaşma	55
4.2	Dilovası Bölgesi Aerosollerinin Uzaysal ve Zamansal Dağılımının İncelenmesi	58
4.2.1	20.07.2011 Tarihinde Lidar Sistemiyle Yapılan Ölçümleme	59
4.2.2	17.08.2011 Tarihinde Lidar Sistemiyle Yapılan Ölçümleme	61
4.2.3	13.09.2011 Tarihinde Lidar Sistemiyle Yapılan Ölçümleme	62
4.2.4	14.03.2012 Tarihinde Lidar Sistemiyle Yapılan Ölçümleme	64
4.2.5	07.04.2012 Tarihinde Lidar Sistemiyle Yapılan Ölçümleme	66
4.2.6	02.05.2012 Tarihinde Lidar Sistemiyle Yapılan Ölçümleme	68
4.3	Örnek Olay İncelemesi: Calipso Uydusu, Uçak ve TÜBİTAK MAM Raman Aerosol Lidarı Eş Zamanlı Ölçümleri	70
5.	SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME	74
	KAYNAKLAR	78
	ÖZGEÇMİŞ	90

SİMGELER ve KISALTMALAR

α	:	Işın azlımı katsayısı
β	:	Geri saçılım katsayısı
c	:	Işık hızı
t	:	Tarama süresi
H	:	Yükseklik
nm	:	Nanometre
μm	:	Mikrometre
λ	:	Dalga boyu
m	:	Kompleks kırılma indeksi
m_R	:	Kompleks kırılma indeksi gerçek kısmı
m_i	:	Kompleks kırılma indeksi gerçekte dışı kısmı
N	:	Sayı yoğunluğu
P	:	Güç
R_{eff}	:	Etkin yarıçap
R_{mean}	:	Ortalama yarıçap
S	:	Yüzey alan yoğunluğu
V	:	Hacim yoğunluğu
z	:	Mesafe
z_{ref}	:	Referans mesafe
Lidar	:	Light detection and ranging (ışık algılama ve mesafe tayini)
IPCC	:	Uluslararası iklim değişikliği paneli
CCN	:	Bulut yoğunlaştırıcı çekirdek
SO ₂	:	Kükürt dioksit
HSRL	:	Yüksek spektral çözünürlüklü lidar
PM	:	Partikül madde
PM ₁₀	:	10 μm çapından küçük partikül madde
PM _{2.5}	:	2.5 μm çapından küçük partikül madde
PM ₁₀ -PM _{2.5}	:	2.5 - 10 μm çapları arasındaki partikül madde
nss-SO ₄ ²⁻	:	Deniz tuzu harici sülfatlar
EPA	:	Çevre koruma ajansı (ABD)

NaCl	:	Sodyum klorür
Si	:	Silisyum
SiO ₂	:	Silisyum dioksit
Al ₂ O ₃	:	Aluminyum oksit
Fe ₂ O ₃	:	Demir oksit
Nd:YAG	:	(neodymium-doped yttrium aluminium garnet)
MAM	:	Marmara Araştırma Merkezi
EARLINET	:	European Aerosol Research Lidar Network
MPLNET	:	Micro-Pulse Lidar Network
AERONET	:	Aerosol Robotic Network
AD-Net	:	Asya toz ağı
ALINE	:	Amerikan lidar ağı
NDACC	:	Atmosferik kompozisyon değişimi algılama için uluslararası
		Ağ
REALM	:	Bölgesel doğu aerosol lidar mesonet
PMT	:	Foto çoğaltıcı (photomultiplier)
PSD	:	Partikül boyut yoğunluğu (particle size density)

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
1.1: Aerosollerin gelen güneş ışınını yansıtma ve absorbe etme özelliklerinin sembolik görüntüsü.	2
1.2: Aerosollerin dolaylı ve doğrudan etkileri	3
1.3: Bulut yoğunlaştırıcı çekirdek sayısına etki eden çeşitli etmenler	4
1.4: İklim sisteminin küresel ışıınım zorlama ve belirsizlik derecesi	5
2.1: Mace Head İrlanda batı sahilinden toplanmış, kurutulmuş denizel aerosol taramalı elektron mikroskopu fotoğrafı	8
2.2: Sahra çölünden taşınmış toz partiküllerinin Atlantik üzerindeki uydu görüntüsü	9
2.3: Toz partiküllerin taramalı elektron mikroskopu görüntüsü	11
2.4: Kuru yapraklar, çim, cam, cam fiber, kağıt, çimento tozu, kömür tozu, hematit, is ve yakılmış odun içeren örneğe ait taramalı elektron mikroskop örneği	14
2.5: Partiküllerin boyutlarına göre akciğere nüfuzu	17
2.6: Atmosferik aerosollerin idealize edilmiş şematik yüzey alanı dağılımı	23
2.7: Lidar ölçümleme süreçleri şematik çizimi	30
3.1: Lidar Sistemi	51
3.2: Lidar sistemi çalışmaktayken	51
4.1: Üç dalga boyundaki lidar sinyalleri	56
4.2: 2 dalga boyunda geri saçılım katsayısı hesaplaması.	57
4.3: 355 ve 532 nm dalgaboylarında ışın azalımı katsayıları hesaplaması	57
4.4: 2 saatlik ölçüm süresince ışın azalımının uzay zamansal değişimi	58
4.5: 20.07.2011, Ortalama lidar sinyali	59
4.6: 20.07.2011, 355 ve 532 nm'de ışın azalımı	60
4.7: 20.07.2011, 532 nm'de ışın azalımı renk haritası	60
4.8: 17.08.2011, Ortalama lidar sinyali	61
4.9: 17.08.2011, 355 ve 532 nm'de ışın azalımı	61
4.10: 17.08.2011, 532 nm'de gerisaçılımın 10 saatlik değişiminin renk haritası	62
4.11: 13.09.2011, Ortalama lidar sinyali	62
4.12: 13.09.2011, 355 ve 532 nm'de ışınazalımı	63
4.13: 13.09.2011, 355 nm' de ışınazalımı	63

4.14: 13.09.2011, 355 nm' de ışın azalımının 22 saatlik değişiminin renk haritası	64
4.15: 14.03.2012, Ortalama lidar sinyali	64
4.16: 14.03.2012, 355 ve 532 nm'de ışın azalımı	65
4.17: 14.03.2012, 355 nm' de ışın azalımı	65
4.18: 14.03.2012, 355 nm' de ışın azalımının renk haritası	66
4.19: 07.04.2012, Ortalama lidar sinyali	66
4.20: 07.04.2012, 355 ve 532 nm' de ışın azalımı	67
4.21: 07.04.2012, 355 nm' de ışın azalımının renk haritası	68
4.22: 02.05.2012, Ortalama lidar sinyali	68
4.23: 02.05.2012, 355 ve 532 nm' de ışın azalımı	69
4.24: 02.05.2012, 532 nm'de ışınazalımı renk haritası	69
4.25: 12:00 ile 16:00 saatleri arasında ortalama lidar sinyali	71
4.26: 16:00 ile 20:00 saatleri arasında ortalama lidar sinyali	71
4.27: 20:00 ile 00:00 saatleri arasında ortalama lidar sinyali	72
4.28: 00:00 ile 04:00 saatleri arasında ortalama lidar sinyali	72
4.29: Seçili zaman aralıklarında ışın azalımının Klett ve Raman yöntemleriyle hesaplarının karşılaştırılması	73
4.30: Seçili zaman aralığında aerosol geri saçılımının renk haritası	73

ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>Çizelge</u>	<u>Sayfa</u>
2.1: Ana aerosol tipleri ve emisyon değerleri	7
2.2: Sırası ile denizel, su ile çözünmeyen (genellikle toz), su ile çözünebilen (sülfatlar, nitratlar vb.) ve is aerosollerinin kırılım indisleri	12
3.1. Kazan bacaları toplam emisyon değerleri	34
3.2: Gebze ve Dilovası ilçeleri aylık PM ve SO ₂ değerleri	35

1. GİRİŞ

Aerosoller, sülfür içeren küçük damlacıklar veya atmosferde yer alan süspanse parçacıklar olarak tarif edilmektedir. Genellikle, doğal (çöl tozu, deniz tuzu, volkanik patlamalar vs.) ve fosil yakıtlarının yakılması gibi antropojenik (insana ait) faaliyetler sonucu yayılırlar. Aerosoller, Uluslararası İklim Değişikliği Paneli'nde (IPCC), boyutları 0.01 - 10 μm arasında olan, havada uçuşan katı veya sıvı partiküllerin toplanması olarak tanımlanmışlardır. Aerosoller doğal ya da antropojenik kökenli olabilirler. Aerosollerin iklim üzerindeki etkileri iki başlık altında tanımlanabilir: Gelen güneş radyasyonunun saçılımı ve soğurulması ile doğrudan etkileri, bulut oluşumu için yoğunlaşma çekirdeği görevi görerek veya bulutların optik özelliklerini ve ömrünü değiştirerek dolaylı etkileri söz konusudur (Houghton et al., 2001).

Aerosollerin dünya üzerinde çeşitli etkileri bulunmaktadır. Bunlar, atmosferik aerosollerin iklim değişiklikleri ve hava kalitesi üzerindeki olumsuz etkileri ve insan sağlığı üzerindeki çeşitli olumsuz etkileridir. Büyük çaplı aerosoller genellikle burun ve ağızdan solunum ile insan vücuduna nüfuz ederler. Küçük çaplı aerosoller ise, bronş ve akciğere ulaşarak astım ve akciğer kanseri gibi hastalıklara sebep olmaktadır. Aynı zamanda aerosoller kardiyovasküler sorunlara ve premature doğumlara, insan vücudunda bakteri veya virüsler gibi davranış göstererek insan sağlığında olumsuz etkilere de sebep olabilmektedir.

Aerosoller hava kalitesinin belirlenmesinde büyük önem taşımaktadır. Aerosol bileşenlerini meydana getiren saf gaz süspansiyonu ile katı ve sıvı parçacıklar (su, karbon ve toz) hava kalitesini kötüleştirerek hava kirliliğine neden olurlar. Örneğin, yanan ürünlerden çıkan nitrojen oksitin atmosferde diğer kimyasallar ile etkileşmesi sonucunda, yer seviyesi ozonunda ve nüfusun yoğun olduğu yerleşim bölgelerinde hava kirliliğine yol açar.

Aerosoller, zamana ve yere göre değişiklik gösterebilen, bulut mikrofiziğine (ışınimsal özelliğini etkileyerek) ve iklim değişikliklerine sebep olan, iklim

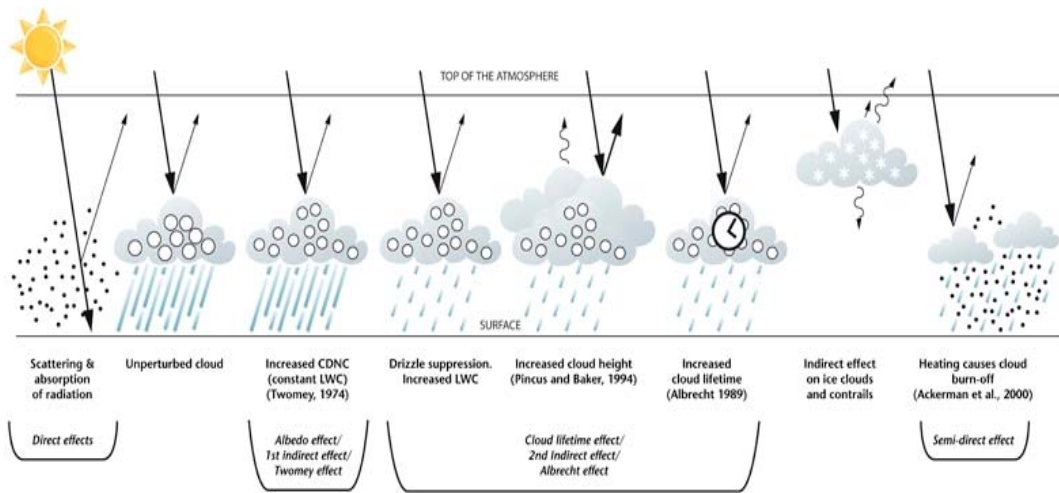
modellemedeki en önemli belirsizlik faktörüdür. Yoğunluklarının düşük olması hızlı hareket edebilme kabiliyetlerini arttırmaktadır. Doğal ya da doğal olmayan kaynaklardan atmosfere taşınan aerosollerin hava hareketleri etkisiyle şehirler, ülkeler ve hatta kıtalar arasında taşınması mümkündür. Söz konusu taşınım sürecinde aerosoller, üzerinde bulunduğu alanlarda da etkilerini gösterirler.

Aerosoller havada asılı partiküller olarak tarif edilmelerine rağmen rüzgar, yer çekimi ve yağış gibi atmosferik hareketlere duyarlıdır. Belirli bir hacim ve kütleye sahip olmaları sebebiyle yeryüzüne gelen güneş ışığını soğurarak veya geri saçılımına sebep olarak küresel enerjiye etki ederler. Bilimsel literatürde bu duruma, aerosollerin doğrudan ya da dolaylı etkileri denir. Temel olarak aerosollerin doğrudan etkisi, havada asılı veya atmosferik hareketlerin etkisiyle hareket halinde olan partiküllerin yeryüzüne gelen güneş ışınlarını soğurması ve yansıtması olarak tarif edilebilir. Aerosol sayısındaki artış, atmosferin ve yer yüzünün soğuması ile sonuçlanan bulut aklık derecesi ve atmosferden yansımanın artması anlamına gelmektedir (K. R. Allakhverdiev et al., 2009). Şekil 1.1' de aerosollerin gelen güneş ışığını yansıtma ve soğurma özelliklerinin sembolik görüntüsü yer almaktadır.



Şekil 1.1., Aerosollerin gelen güneş ışığını yansıtma ve absorbe etme özelliklerinin sembolik görüntüsü.

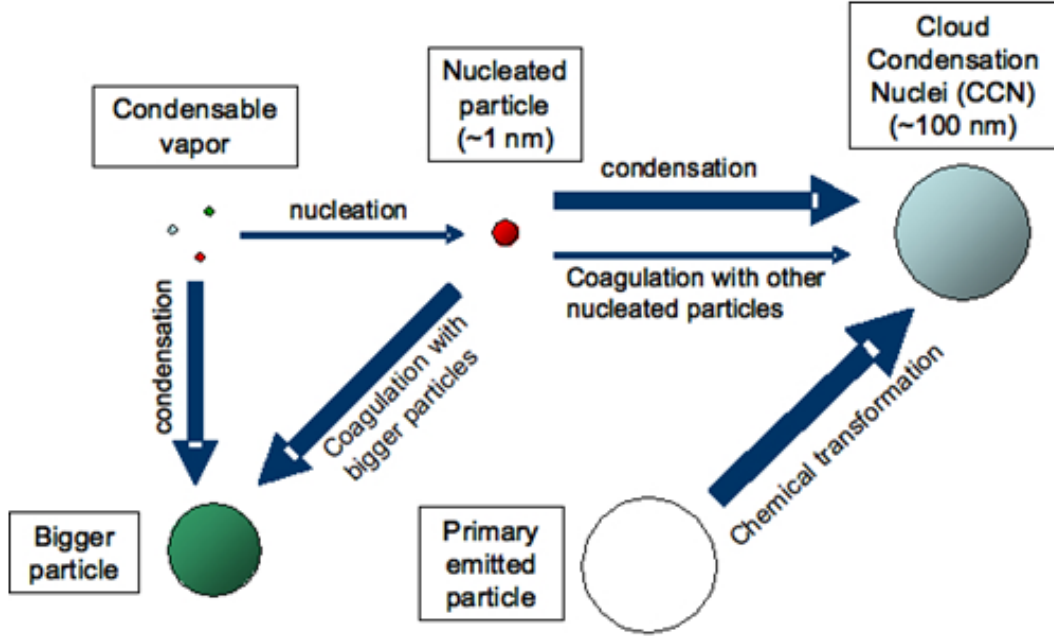
Aerosollerin dolaylı etkisi ise, bulut yoğunlaştırıcı çekirdek (CCN) gibi davranış göstererek bulut damlacıklarının mikrofiziksel ve optik özelliklerini değiştirmesi olarak tarif edilebilir. Aerosollerin dolaylı etkisi iki kategoriye ayrılmaktadır. İlk dolaylı etki, aerosol partikül sayısının konsantrasyonu arttıkça bulut damlacık etkili yarıçapının azalmasının daha yüksek bulut aklık derecesine yol açmasıdır (Twomey, 1974). Su buharının yeryüzünden yükselmesi ve hidrofilik aerosoller ile bağlanması sonucunda aerosol yarıçapı artar. Daha fazla su buharının daha fazla hidrofilik aerosoller ile bağlanması neticesinde bulut oluşumu meydana gelir. Bulutun su ile doygun hale gelmesi neticesinde ise yağmurlar meydana gelir. Bu nedenle aerosollerin mikrofiziksel parametrelerinin, zamansal ve mekansal dinamiklerinin de anlaşılması yağışlar için oldukça önemlidir. İkinci dolaylı etki ise bulut damlacık etkili yarıçapının azalmasının aynı zamanda yağış kısıtlaması ile sonuçlanmasıdır. (Albrecht, 1989). Şekil 1.2’de aerosollerin doğrudan ve dolaylı etkilerinin sembolik çizimi yer almaktadır.



Şekil 1.2., Aerosollerin dolaylı ve doğrudan etkileri

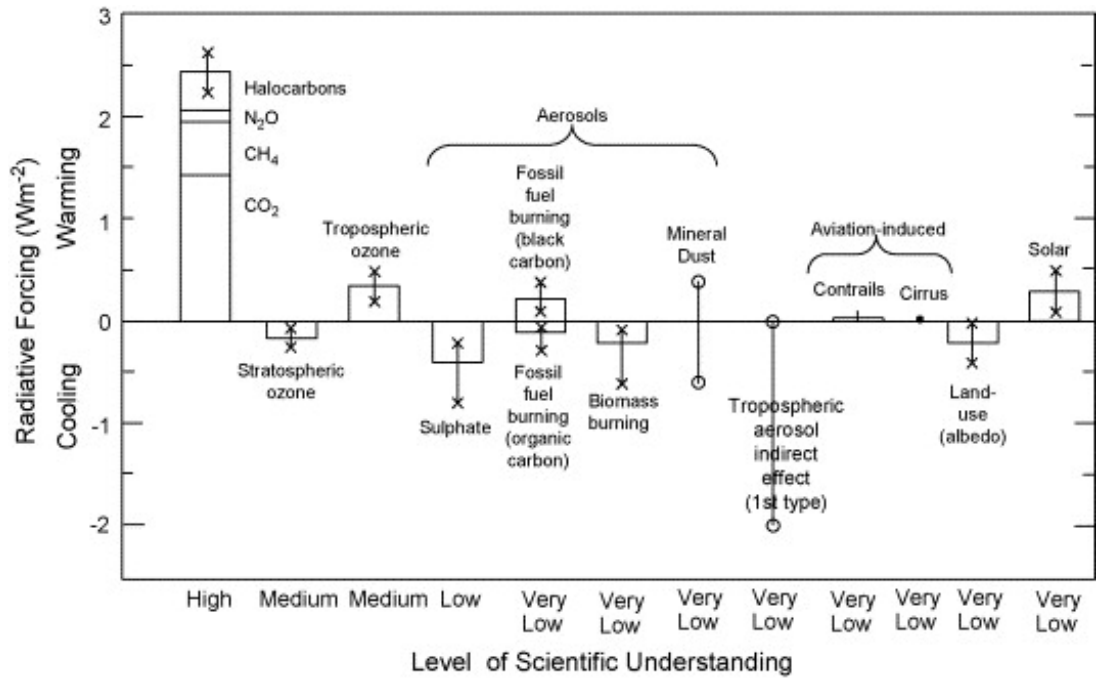
Aerosoller ne kadar çok bulut yoğunlaştırıcı çekirdek (CCN) gibi davranış gösterirler ise, yükselen su buharı o kadar çok aerosol ile bağlanır ve bunun sonucunda bulut damlacık etkili yarıçapının daha düşük olmasına sebebiyet verir. Bu durum neticesinde yağış azalır ve bulut ömrü uzar. Şekil 1.3’te bulut yoğunlaştırıcı

çekirdek (CCN) sayısının artmasına etki eden faktörlerin sembolize edilmiş hali yer almaktadır.



Şekil 1.3., Bulut yoğunlaştırıcı çekirdek sayısına etki eden çeşitli etmenler (<http://www.metoffice.gov.uk/climate-change/guide/science/explained/aerosols>, Nisan 2012)

İnsan faaliyetlerinin gün geçtikçe artması nedeniyle atmosferdeki aerosollerin sayıları da artarak iklim soğumasına sebep olmaktadır. Bu soğuma eylemine karşılık yine insan faaliyetleri neticesinde oluşan sera gazı etkisi ile de küresel ısınma meydana gelmektedir. Her ne kadar insan faaliyetleri sonucunda oluşan sera gazı etkisiyle küresel ısınma üzerine etkiler ölçülebilir olsa da, aerosollerin iklim soğutma üzerindeki etkileri tam olarak ölçümlenemeyen ve belirsizliğini koruyan bir etmendir. 2001 yılındaki Uluslararası İklim Değişikliği Paneli'nde (IPCC), söz konusu küresel ısınma ölçümlemeleri ve aerosollerin iklim soğutma üzerindeki belirsizliğinin değerlendirmeleri yapılmıştır. Söz konusu değerlendirme Şekil 1.4'te gösterilmektedir.



Şekil 1.4., İklim sisteminin küresel ısıtım zorlama ve belirsizlik derecesi (IPCC, 2001).

Atmosferik aerosoller, yeryüzünde gazların yoğunlaşması ve rüzgar hareketlerinin etkisi ile meydana gelmektedir. Yarıçapları 1 nm'den küçük olan aerosol partiküller genellikle öncü gazların yoğunlaşması neticesinde oluşurlar. Fosil yakıtlarının yakılması ile volkanlar ve diğer benzeri kaynaklardan yayılan SO₂'nin atmosferde oksitlenmesi sonucu önemli bir öncü gaz olan sülfirik asitin oluşumu gerçekleşir.

2. ATMOSFERİK AEROSOLLER VE LİDARLA TESPİTİ

2.1 Aerosollerin Çeşitlerine Göre Sınıflandırılması

Atmosferik aerosollerin optik özellikleri kimyasal bileşimleri, konsantrasyonları, boyutları, şekilleri ve havada asılı katı-sıvı partiküllerin iç yapıları ile belirlenebilmektedir. Tüm bu karakteristikler zaman ve uzayda değişim göstermektedirler. Herhangi bir zaman diliminde yeni partiküller atmosferik hacme eklenebilir veya atmosferik hacmi terk edebilirler. Atmosferde çok çeşitli partiküller bulunmaktadır. Bunlar çeşitlerine göre sülfatlar, nitratlar, bakteri ve polenler gibi biyolojik partiküller, organik partiküller, is, denizel tuzlar vb'dir. Genellikle bu tarz partiküllerin boyutları 100 nm civarındadır. Bu sebeple çıplak gözle görülmezler. Buna rağmen aerosol partikülleri önemli ölçüde görüş mesafesini düşürür, iklime etki eder ve insan sağlığına olumsuz yönde tesir eder.

Atmosferde yer alan partikül maddelerin üç ana kaynağı vardır. Yeryüzünden atmosfere giriş yapan partiküller (toz, denizel tuzlar vb.), gazdan partiküle dönüşüm ile atmosferde oluşan partiküller ve uzaydan atmosfere giriş yapan partiküller (kozmik aerosoller) söz konusu bu üç ana kaynağı oluşturmaktadır. Aerosol partiküllerinin atmosferde izole şekilde durmaları mümkün değildir. Atmosferde bulut damlacıkları, buz kristalleri ve gazlarla etkileşime girerler.

Atmosferde oluşan partiküller aerosol sayı konsantrasyonuna etki ederler. Alt atmosfer katmanındaki kozmik aerosollerin etkileri ise ihmal edilebilir. Ancak kozmik aerosoller yeryüzüne ait aerosollerin az olduğu yüksek atmosfer katmanlarında hava özelliklerine etki edebilirler.

İnsan kaynaklı aerosollerin gezegen ölçeğinde önemli etkileri bulunmaktadır. Özellikle endüstriyel aktivitelere ve ulaşımına bağlı olarak öncü gazların

konsantrasyonu artmaktadır. Aynı zamanda aerosoller için de bu durum söz konusudur. Endüstriyel aktiviteler ve ulaşım gibi insan faaliyetlerine bağlı olarak atmosferde aerosollerin sayı yoğunluğu artmakta ve bu durum karşısında iklim değişiklikleri ve insan sağlığına olumsuz tesirleri söz konusu olmaktadır. İnsan faaliyetlerine bağlı olarak ortaya çıkan sera gazı etkisi, yeryüzünde küresel ısınmaya sebep olmakta iken, aynı insan faaliyetleri sonucu ortaya çıkan ve atmosfere yükselen aerosollerin etkisi ile tam tersi etki yani aerosollerin doğrudan ve dolaylı etkileri ile yeryüzünü soğurması söz konusu olmaktadır. Aerosollerin doğrudan ve dolaylı etkilerinin iklim üzerindeki etkilerinin net olarak anlaşılabilmesi için mekansal ve mikrofiziksel özellikleri ile çeşitlerinin çok iyi bilinmesi gerekmektedir (Alexander A. Kokhanovsky, Aerosol Optics, 2008).

Atmosferik aerosoller genellikle kaynakları ve kimyasal bileşimleri bakımından sınıflandırılırlar. Ana aerosol tipleri Çizelge 2.1’de gösterilmektedir.

Çizelge 2.1., Ana aerosol tipleri ve emisyon değerleri.(Landolt and Bornstein, 1988)

Aerosol type	Emission (10^6 tons per year)
Sea-salt aerosol	500–2000
Aerosol formed in atmosphere from a gaseous phase	345–2080
Dust aerosol	7–1800
Biological aerosol	80
Smoke from forest fires	5–150
Volcanic aerosol	4–90
Anthropogenic aerosol	181–396

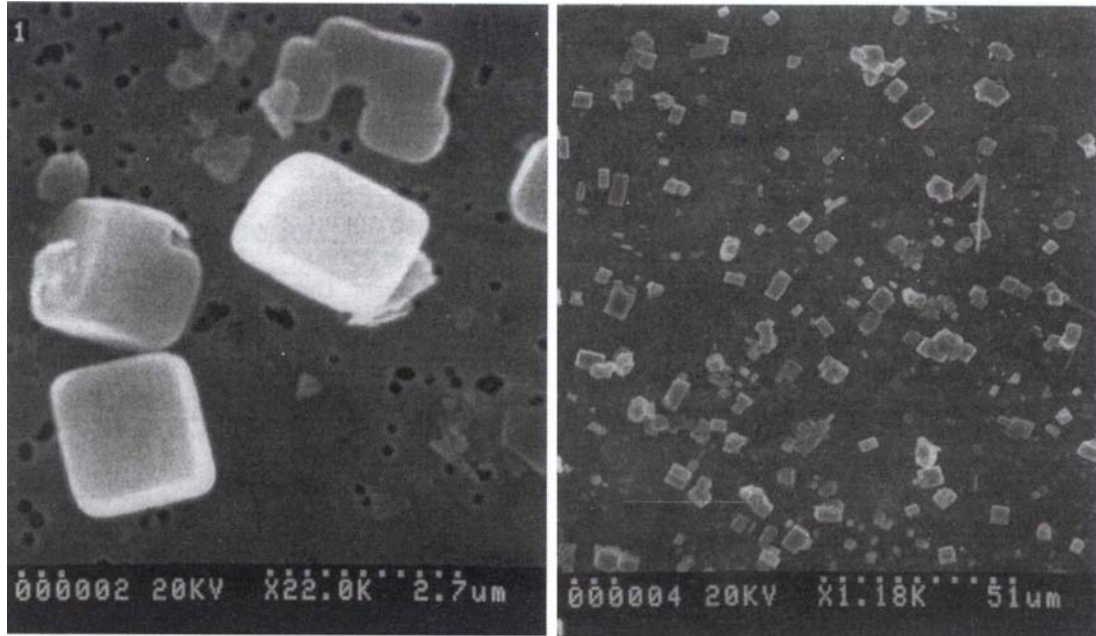
2.1.1 Denizel Aerosoller

Denizel aerosoller dalga kırılma olayları ile okyanuslardan kaynaklanan, çapları $0,1 \mu\text{m}$ - $1000 \mu\text{m}$ arasında değişen, deniz suyu damlacıkları ve tuz partiküllerinden meydana gelen aerosoller olarak tanımlanmaktadır. Büyük damlacıklar kaynaklandıkları yakın alanlara düşmekte iken, boyutları $0,1 \mu\text{m}$ ’den $1 \mu\text{m}$ ’ye kadar olan küçük aerosol partikülleri rüzgarların da etkisiyle atmosfere taşınarak denizlerden kaynaklanan atmosferik denizel aerosollerini meydana getirirler.

Bu partiküller atmosferde uzun süre kalabilir ve hava hareketleri sonucundaki taşınımları ile kıtalar üzerinde tespit edilebilirler.

Denizel aerosoller, hava deniz etkileşiminde büyük önem teşkil ederler ve atmosfer kimyası, jeokimya, atmosferik ısıma, meteoroloji, bulut fiziği, iklim, oşinografi, kıyı ekoloji alanlarında baskın rol oynarlar (Finlayson and Pitts et al., 2000,2003,2004). Farklı türdeki aerosollerin az bulunduğu deniz atmosferinde, yeryüzüne gelen ışığı yansıtma (aerosol doğrudan etkisi) ve bulut yoğunlaşma çekirdeği gibi davranarak bulut oluşumuna etki eden (aerosol dolaylı etkisi) baskın kirleticiler olarak değerlendirilmektedir (Houghton et al., 2001). Bulut yoğunlaştırıcı çekirdek (CCN) etkilerine sahip olmaları sebebiyle, aerosol dolaylı etkilerinin belirlenmesi için yüzey karakterizasyonu büyük önem taşımaktadır.

Denizel aerosollerin şekilleri neme bağlı olarak değişiklik gösterebilir. Düşük nem şartlarında denizel aerosoller kübik partikül şeklindedirler (Şekil 2.1).

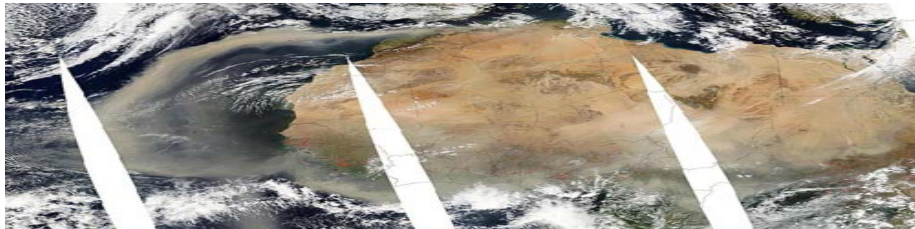


Şekil 2.1., Mace Head İrlanda batı sahilinden toplanmış, kurutulmuş denizel aerosol partiküllerinin taramalı elektron mikroskopu fotoğrafı (Chamaillard et al., 2003).

Söz konusu kübik şekil, sodyum klorür kübik yapıya sahip olmasından kaynaklanmaktadır. NaCl suda kolaylıkla çözünebilir. Bu sebepten kübik yapı yüksek nem şartlarında küresel şekle dönüşebilir. Bu durum neticesinde denizel aerosollerin şekil değişikliği bakımından son derece dinamik olduğu görülmektedir. Şekillerin ışık ile etkileşim süreçlerindeki önemli etkileri nedeniyle denizel aerosollerin evrensel optik modelini inşa etmek oldukça zordur. Bunun için en az iki optik model (düşük nem ve yüksek nem şartlarında) gereklidir. Söz konusu optik modelleme için çeşitli hesaplamalar geliştirilerek yapılmakta ve tez konusunda ele alınmamaktadır.

2.1.2 Toprak Tozu Aerosoller

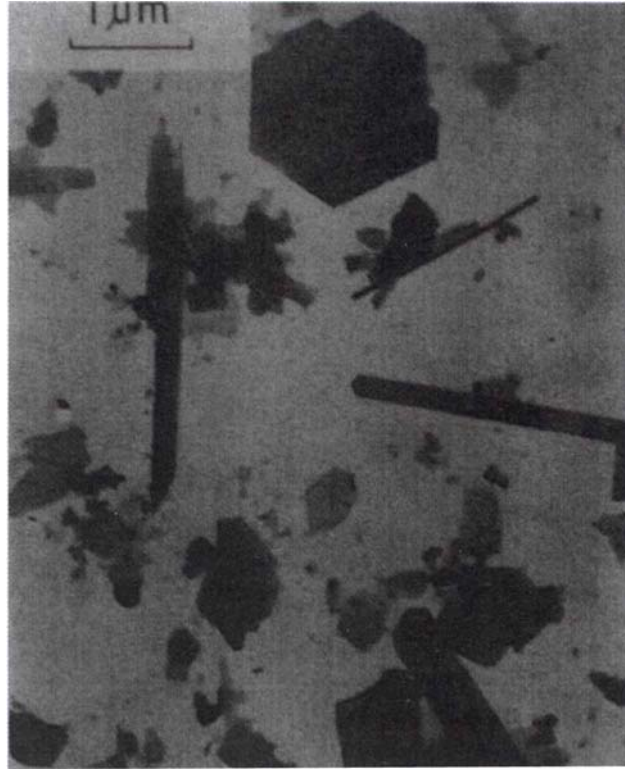
Toprak tozu aerosoller doğal ve antropojenik olmak üzere yeryüzeyinden kaynaklanan katı partiküllerdir. Genel olarak dünyanın en büyük çöllerinden (Sahra, Gobi ve Taklimakan gibi) kaynaklanmaktadır. Ancak Sahra Çölü kirletici özelliği ile en büyük paya sahip olduğundan, toprak tozu aerosollerini bilimsel literatürde Sahra Tozu olarak da nitelendirilmektedir. Toprak tozu aerosollerin diğer kaynakları ise volkanlar, bitki örtüsü ve endüstriyel aktivitelerdir. Işıma, bulut özellikleri, atmosferik sirkülasyon üzerindeki etkileri ile iklim sistemi için büyük önem taşırlar. Toz aerosoller küresel anlamda baskın aerosol tipleridir. Hava hareketlerinin de etkisi ile kaynaklandıkları bölgeden kilometrelerce uzağa taşınabilirler. Şekil 2.2’de Sahra Çölü’nden kaynaklanan toz aerosollerinin hava hareketleri ile Atlantik üzerinde tespit edilmiş uydu görüntüsü yer almaktadır.



Şekil 2.2., Sahra çölünden taşınmış toz partiküllerinin Atlantik üzerindeki uydu görüntüsü (www.sussex.ac.uk/geography/research/clusters/climateresearch/aerosols, Nisan 2012).

Atmosferde yer alan toz aerosoller, yeryüzüne gelen güneş ışığını yansıtarak ve kısmen soğurarak dünyanın solar ve termal enerji dengesine etki ederler (IPCC., 2001). Atmosferde bulunan toz yükündeki herhangi bir değişim, örneğin çok soğuk dönemlerdeki atmosferde toz yoğunluğunun artması, ışıınımda ve bunun neticesinde yeryüzü sıcaklığında değişime sebep olur. Büyüklük ve ışıınımsal toz kuvveti tozun optik özelliklerine, dikey dağılımlarına, bulut örtmesine ve aklık derecesine bağlı belirsizliklerdir (Liao et al., 1998). Tozun optik özellikleri ise partikül boyutu ve kırılım indeksine bağlıdır (Patterson, 1981; Sinyuk et al., 2003; Sokolik et al., 2001). Bu özelliklerdeki belirsizlikler ise ışıınımsal zorlamadaki en büyük belirsizliğe önderlik etmektedir (Sokolik et al., 2001). Aynı zamanda tozlar siyah karbon ve diğer kirleticiler ile etkileşime girerek tüm toz aerosol optiğini değiştirebilirler (Huebert et al., 2003).

Çoğu toprak tozu aerosol partikülleri (örneğin Si'den oluşan) suda çözünebilir değildir. Bu sebeple denizel aerosoller gibi atmosferdeki nemden etkilenip şekil değiştirmezler. Ancak yüksek nem şartlarında katı partiküller, atmosferdeki su veya buz damlacıklar ile kaplanabilir. Bu durum partikülün optik özelliklerini değiştirebilir. Genellikle su ile kaplanmış olan ıslak katı partiküller kuru şartlara kıyasla daha düşük kırınım indisine sahiptirler. Bu sebepten nem etkileri tamamiyle ihmal edilemez. Denizel aerosollerin aksine, toz partiküllerin küresel şekle sahip olmayışı dikkate alınmalıdır ki, bu durum toz aerosollerin optik modellemesini zorlaştırmaktadır. Toz partikülleri çeşitli ve özgün şekillere sahip olabildiklerinden dolayı çeşitliliklerinin hesaplanması da oldukça zordur (bkz. Şekil 2.3). Bu nedenle bazı hesaplamalar ikiz kutup veya geometriksel optik varsayımlara (küresel veya eliptik şekil varsayımı) dayandırılarak yapılmaktadır (Kokhanovsky, 2004).



Şekil 2.3., Toz partiküllerin taramalı elektron mikroskobu görüntüsü (Kalashnikova and Sokolik, 2004).

2.1.3 İkincil Aerosoller

Atmosferde gaz - partikül dönüşüme bağlı olarak meydana gelen ikincil aerosoller genellikle sülfat ve nitratlardan oluşurlar. Özellikle SO_2 , H_2SO_4 'e okside olur ve bu dönüşüm hızı ağır metal iyonlarının varlığından etkilenir (örneğin Fe, Mn).

Oluşan partiküllerin çoğu küresel şekillidirler. Konsantrasyonları 3000 cm^{-3} ila 7000 cm^{-3} arasında olmakta iken bu değer, ağır hava kirliliği şartlarında 15000 cm^{-3} ve daha yüksek değerlere ulaşabilir.

Yukarıda bahsi edilen konsantrasyon parametreleri neme bağlı olarak değişebilmektedir. Bu tür aerosoller hemen hemen tüm bölgelerde bulunabilir

olduğundan küresel aerosol yığını için önemli rol oynamaktadır (Lacis and Mischenko, 1995). İkincil aerosollerin kırınım indisi modelleme değerleri Çizelge 2.2' de verilmiştir.

Çizelge 2.2., Sırası ile denizel, su ile çözünmeyen (genellikle toz), su ile çözünebilen (sülfatlar, nitratlar vb.) ve is aerosollerinin kırınım indisleri (WCP-112, 1986).

λ , nm	n	χ	n	χ	n	χ	n	χ
300	1.40	$5.8 \cdot 10^{-7}$	1.53	$8.0 \cdot 10^{-3}$	1.53	$8.0 \cdot 10^{-3}$	1.74	0.47
400	1.39	$9.9 \cdot 10^{-9}$	1.53	$8.0 \cdot 10^{-3}$	1.53	$5.0 \cdot 10^{-3}$	1.75	0.46
550	1.38	$4.3 \cdot 10^{-9}$	1.53	$8.0 \cdot 10^{-3}$	1.53	$6.0 \cdot 10^{-3}$	1.75	0.44
694	1.38	$5.0 \cdot 10^{-8}$	1.53	$8.0 \cdot 10^{-3}$	1.53	$7.0 \cdot 10^{-3}$	1.75	0.43
860	1.37	$1.1 \cdot 10^{-6}$	1.52	$8.0 \cdot 10^{-3}$	1.52	$1.2 \cdot 10^{-2}$	1.75	0.43
1060	1.37	$6.0 \cdot 10^{-5}$	1.52	$8.0 \cdot 10^{-3}$	1.52	$1.7 \cdot 10^{-2}$	1.75	0.44
1300	1.37	$1.4 \cdot 10^{-4}$	1.46	$8.0 \cdot 10^{-3}$	1.51	$2.0 \cdot 10^{-2}$	1.76	0.45
1800	1.35	$3.1 \cdot 10^{-4}$	1.33	$8.0 \cdot 10^{-3}$	1.46	$1.7 \cdot 10^{-2}$	1.79	0.48
2000	1.35	$1.1 \cdot 10^{-3}$	1.26	$8.0 \cdot 10^{-3}$	1.42	$8.0 \cdot 10^{-3}$	1.80	0.49
2500	1.31	$2.4 \cdot 10^{-3}$	1.18	$9.0 \cdot 10^{-3}$	1.42	$1.2 \cdot 10^{-2}$	1.83	0.51

Peterson ve Junge (1971) yılda 780.000.000 ton ikincil aerosollerin ve yaklaşık aynı değerlerde yeryüzünden kaynaklanan aerosollerin (500 milyon tonu denizel aerosoller, 250 milyon ton toprak tozu aerosolleri olmak üzere) oluştuğunu tahmin etmektedirler. Bu değerlere göre yılda 1.5×10^9 ton aerosollerin oluştuğu gözlenmektedir. Aerosol partikül yoğunluğunun $1,5 \text{ gr/cm}^3$ olduğu varsayılarak, toplam oluşan aerosol hacminin 1 km^3 olduğu hesaplanmaktadır. Orman yangınları, volkanlar ve diğer aerosol kaynakları gibi antropojenik aerosollerin (%10 civarında) de eklenmesi ile söz konusu hacim daha da artmaktadır. Her ne kadar gezegen ölçeğinde 1 km^3 hacim küçükmüş gibi gözükse de, bu oran yerküreye ait atmosfer açısından aerosollerin kütle, ısı ve enerji transferinde büyük önem taşıdığının bir göstegesidir (Alexander A. Kokhanovsky, 2008).

2.1.4 Organik Aerosoller

Organik aerosoller havadaki partikül maddenin büyük ve baskın bir bölümünü teşkil eder. Aerosol partiküllerinin fiziksel ve kimyasal özelliklerine etki ederek

gazlar, su buharı, bulutlar, yağış ve ısıma ile etkileşime girerek atmosfer ve iklim üzerinde etkiler gösterirler. Buna ek olarak solunum, kardiyovasküler fonksiyonlar ve alerjik hastalıklar üzerindeki etkileri ile insan sağlığını etkilerler.

Organik aerosol partiküller, atmosferde gaz - partikül dönüşümü (ikincil organik aerosoller) ve yeryüzünden kaynaklanan (birincil organik aerosoller) aerosollerden meydana gelmektedir. Buna ilavaten, her iki organik aerosol türleri atmosferde diğer aerosol bileşenleri ile birleşerek gazlarla etkileşime girebilmektedirler. Atmosferde var oluş süreleri aerosol partiküllerinin fiziksel, kimyasal özelliklerine ve çevresel etkilerine tesir ederler. Günümüzde organik aerosol bileşenlerinin, fiziksel, kimyasal özellikleri, kaynakları, dönüşüm karakteristikleri çok az bilinmesine rağmen, çevresel etkileri en büyük belirsizlik unsurudur. Özellikle aerosol-bulut-iklim etkileşimi henüz anlaşılamamıştır (Sandro Fuzzi et al., 2006).

2.1.5 Volkanik Aerosoller

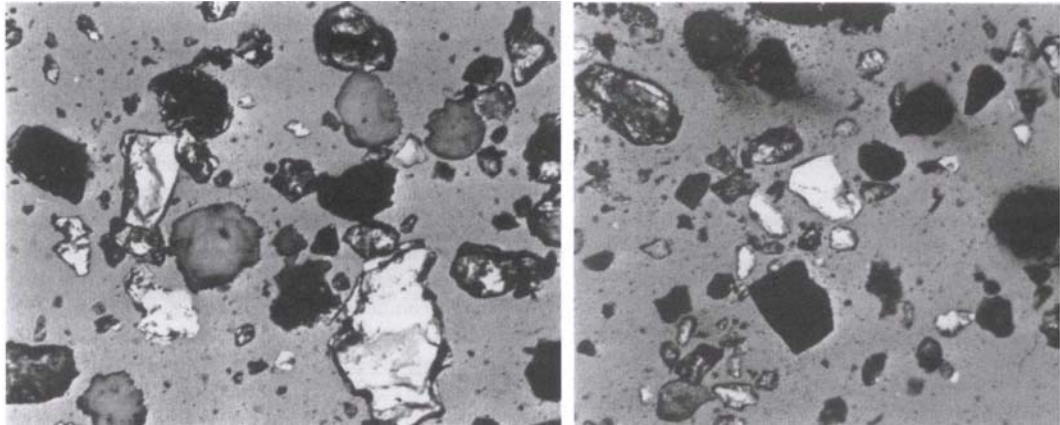
Volkanik aerosoller, volkanik aktiviteler sonucunda partiküllerin ve gazların atmosfere yayılması ile oluşmaktadırlar. Volkanlardan açığa çıkan çoğu partikül (toz ve kül), genellikle troposferde yer alan SiO_2 , Al_2O_3 ve Fe_2O_3 gibi metalik oksitler, silikatlar ve madeni partiküllerdir.

Volkanlar atmosfer için en büyük doğal kirletici kaynaklar olup (Robock, 2002) üst troposferde buz partikülleri için bulut yoğunlaştırıcı çekirdek gibi davranış gösteren sülfat aerosolleri için önem taşımakta ve atmosferde aerosol birikimine sebep olmaktadır (Alexander A. Kokhanovsky, 2008). Atmosferde hava hareketlerinin de etkisiyle taşınımları mümkündür ve partikül boyutlarına göre atmosferde yaşam süreleri değişiklik göstermektedir. Ancak bu tür kaba partiküllerin stratosferde yaşam süreleri 1-2 aydır.

Volkanlardan kaynaklanan sülfür türlerinin en az antropojenik sülfürler kadar dünyanın ısınımsal bütçesine büyük tesirleri bulunmaktadır (Graf et al., 1998). Yeryüzüne gelen güneş ışığını absorbe ederek ve geri saçılımına sebep olarak yeryüzünün soğumasına etki ederler. Bunun yanı sıra, troposferik volkanik aerosoller üzerinde bulundukları alanlarda ekosisteme ve insan sağlığına da etki ederler.

2.1.6 Antropojenik Aerosoller

Birincil partiküller (egzos gazları, tozlar vb.) ve insan kaynaklı gaz emisyonlarından oluşan ikincil aerosollerden meydana gelmektedir. İkincil sıvı partiküller ufak boyutlu ve küreye çok yakın şekle sahiptirler. Ancak antropojenik aerosoller düzensiz ve büyük partiküllerdir (Şekil 2.4).



Şekil 2.4., Kuru yapraklar, çim, cam, cam fiber, kağıt, çimento tozu, kömür tozu, hematit, is ve yakılmış odun içeren örneğe ait taramalı elektron mikroskop örneği (Kokhanovsky A.A., 2008).

Antropojenik aerosoller toplam aerosol kirliliğinin %10 kadarını muhteva ederler. Bu küçük kirliliğin (ancak büyümekte olan) iklim üzerindeki etkileri tam olarak bilinmemekle birlikte ileride dikkate alınması gereken bir aerosol türüdür (Tsigairidis et al., 2006). Bunun sebebi ise, gün geçtikçe insan gereksinimlerinin doğurduğu ve bu gereksinimler doğrultusunda geliştirilen teknolojiler, kullanılan teknolojilerden kaynaklanan aerosol kirleticilerinin gün geçtikçe artmasıdır.

Günümüz dünyasında insan aktiviteleri sonucu açığa çıkan gaz emisyonları sebebi ile insanların atmosfer üzerinde olumsuz etkileri olduğu gerçektir. İnsan faaliyetleri sonucu açığa çıkan gaz emisyonları, güneşten gelen radyasyonun bir yandan dış uzaya yansımaları önleyerek, diğer yandan da bu radyasyondaki ısıyı soğurarak yerkürenin fazlaca ısınmasına yol açmasına rağmen, yine insan faaliyetleri oluşan antropojenik aerosoller bu yansımaları azaltabilir ya da yükseltebilir. Yüksek is içeren aerosoller, atmosferde karanlık bulutların oluşumuna sebep olarak ve atmosferin beyazlık derecesini azaltarak soğumaya sebep olmaktadır. Kirliliği temizleme çalışmaları her ne kadar atmosferdeki kirliliği düşürse de, ısı dalgalarının dolayısıyla küresel ısınmanın riskini arttırmaktadır (Meehl and Tibaldi, 2004). Bu sebeple, aerosollerin atmosferdeki etkilerinin ve belirsizliklerinin araştırılması günümüz dünyasında büyük önem taşımaya başlamıştır. Özellikle son yıllarda yapılan çalışmalar ile aerosollerin atmosfer, dünya, çevre ve insan üzerindeki etkileri araştırılmaktadır. Bu araştırmalarda çeşitli teknikler kullanılmaktadır. Bu tekniklerden biri de, bu tez çalışmasında kullanılan Lidar yöntemidir. Söz konusu teknik hakkında detaylı bilgi ilerleyen bölümlerde verilmiştir.

2.2 Aerosollerin Çevresel Etkileri

Özellikle son yüzyılda sanayileşme ve kentleşmenin de artması ile fosil yakıtların kullanılması, tarımsal faaliyetler ve arazi kullanımındaki değişimler ile insan faaliyetleri sonucunda sera gazlarının ve sülfat aerosollerinin atmosferdeki birikimlerini arttırmaktadır. Volkanlar, okyanuslar-denizler ve çöl tozları ile birleşen insan faaliyetleri (antropojenik) sonucu atmosferde biriken aerosoller atmosferi soğutma eğilimi gösterirken, sera gazlarının birikimi atmosferde ısıtma eğilimindedir.

Yerküre, Güneş'ten gelen kısa dalgalı ışınımın bir bölümünü yeryüzünde, bir bölümünü alt atmosferde (troposferde) emer. Güneş ışınımının bir bölümü ise, emilme gerçekleşmeden, yüzeyden ve atmosferden yansıyarak uzaya kaçar. Yüzeyde ve troposferde tutulan enerji, atmosfer ve okyanus dolaşımıyla yeryüzüne dağılır ve

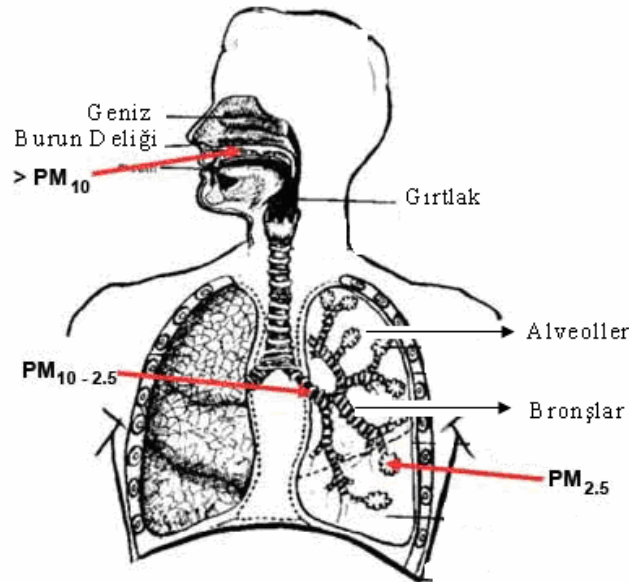
uzun dalgalı yer ışıını olarak atmosfere geri verilir. Yeryüzünden salınan uzun dalgalı ışıının önemli bir bölümü, yine atmosfer tarafından emilir ve daha az güneş enerjisi alan yüksek enlemlerde ve düşük sıcaklıklarda salınır. Atmosferdeki gazların gelen Güneş ışıınına karşı geçirgen, buna karşılık geri salınan uzun dalgalı yer ışıınına karşı çok daha az geçirgen olması nedeniyle Yerküre'nin beklenenden daha fazla ısınmasını sağlayan ve ısı dengesini düzenleyen bu doğal süreç, Sera Etkisi olarak adlandırılmaktadır.

Genel olarak, troposferdeki aerosollerde gözlemlenen artışlar, iklimi soğutma eğilimindeki bir negatif ışıımsal zorlama oluşturur. Troposferdeki aerosoller ve özellikle fosil yakıtların yanmasından çıkan kükürt dioksit kaynaklı sülfat aerosoller, güneş ışıını yeryüzüne ulaşmadan aerosollerin doğrudan etkisi ile soğurur ve/veya uzaya yansıtır. Aerosol birikimlerindeki değişiklikler, bulut miktarını ve bulutun yansıtma özelliğini değiştirebilir. Aerosollerin birincil dolaylı etkisi ile su buharının yeryüzünden yükselmesi ve hidrofilik aerosoller ile bağlanması sonucunda aerosol yarıçapı artar, daha fazla su buharının daha fazla hidrofilik aerosoller ile bağlanması neticesinde bulut oluşumu meydana gelir. Bulutun su ile doymuş hale gelmesi neticesinde ise yağmurlar meydana gelir. Oluşan yağmurlar (asit ve aerosol yağmurları) ile atmosferde yer alan hava kirleticileri yeryüzüne inerek, bitki örtüsünün bozulmasına (bitkilerin stoma açıklıklarını tıkayarak ve fotosentez işlevini bozarak), toprak verimliliğinin azalmasına ve çevresel kirliliğe sebep olabilmektedir. İkinci dolaylı etki ise bulut damlacık etkili yarıçapının azalması aynı zamanda yağış miktarının azalması ile sonuçlanmasıdır (Albrecht, 1989). Yağışların azalması ile kuraklık meydana gelebilmekte ve bu durum neticesinde sosyal ve doğal ortam zarar görebilmektedir.

Her ne kadar aerosollerin atmosferdeki çeşitli etkileri bilinmekteyse de aerosollerin taşıdığı belirsizlikler, veri ve bilimsel bulgunun eksikliği nedeniyle iklim ve çevresel etkileri üzerine küresel bir değerlendirme yapmak oldukça zordur.

2.2.1 Aerosollerin İnsan Sağlığına Etkileri

Aerosol kirliliği ile ilişkili sağlık problemleri ilk olarak 1970'lerin başında etkilerini göstermeye başlamıştır. Aerosollerin alerji, astım, akciğer kanseri, kalp-damar sorunları, erken doğum ve doğum kusurları, erken ölümler gibi insan sağlığı üzerinde etkileri olduğu gözlenmiştir. Parçacık boyutlarına göre insanlar üzerinde farklı etkileri görülmektedir. 10 μm ve bu değerden daha küçük aerosollerin solunumu bronşlar ve alveoller başta olmak üzere akciğerin en derin bölgelerine nüfuz edebilmektedir. Daha büyük aerosoller, burunda ve boğazlarda filtrelenebilmektedir ancak yoğun konsantrasyonlarda solunumu ile düzensiz nefes alma sorunları doğurabilmektedir. 2,5 μm ve bu değerden daha küçük aerosoller akciğeri geçerek diğer organlara da nüfus edebilirler. Amerikan Tıp Birliği Dergisi'nde yayınlanan bir makalede, 2,5 μm 'den küçük aerosollerin damar ve damar ucu iltihabı, kalp krizi ve kardiyovasküler rahatsızlıklara sebebiyet verdiğine değinilmiştir (C. Arden et al., 2002). Şekil 2.5'te partiküllerin boyutlarına göre akciğerlere nüfuzu şematik olarak gösterilmektedir.



Şekil 2.5., Partiküllerin boyutlarına göre akciğere nüfuzu (Aytuğ Sivaslıgil, GYTE Tez, 2007)

100 nm ve bu değerden daha küçük aerosol partiküller insan vücudunda hücre zarını geçerek beyin gibi diğer organlara da ulaşabilmektedir. Bunun neticesinde Alzheimer gibi hastalıklara sebep olduğu tespit edilmiştir. Özellikle dizel motorların yaymış olduğu emisyonlar ile 100 nm'den kk aerosol partiküllerin atmosfere yayıldığı gözlemlenmiş ve yüzeyinde benzopyrenes bileşenleri taşıyan kurumlu partiküllerin kansorejen etkileri olduğu bilinmektedir.

10 μ m çapındaki bir parçacık, 100 nm çapındaki yaklaşık 1 milyon parçacık ile aynı kütleye sahip olmasına karşın insan vücudunda daha az etkilere sahiptir.

Epidomolejik alışmalar göstermiştir ki atmosferik partiküllerdeki artışlar hastalık ve ölümlerde de artışlara sebep olmuştur (Yang et al., 2008). Hastalık ve ölümlerle sonuçlanan atmosferik aerosollerin insan sağlığındaki etkileri, (i) partikül boyutu, yoğunluğu, yüzey özellikleri ve şekline, (ii) hava yolları ve alveol yapısı, (iii) solunum düzeni, akış hızı ve gidiş geliş yoğunluğu olmak üzere üç etkene bağlıdır (Gronenberg et al., 2003).

Hava kalitesi ve alerjik hastalıklar arasındaki ilişki çok fazla bilinmemekle birlikte özellikle son yıllarda endüstriyel bölgelerde hava kirliliğin yüksek konsatrasyonlara ulaşması neticesinde alerjik hastalıkların da artış gösterdiği belirlenmiştir.

Aerosollerin sağlık üzerindeki olumsuz etkilerinin aydınlatılabilmesi ve azaltılabilmesi için moleküler düzeyde tehlikeli kimyasalların ve reaksiyonların atmosferik ve biyomedikal araştırmalara entegre edilebilmesi gerekmektedir. Tehlikeli aerosol bileşenlerinin, kaynaklarının ve havzalarının (emisyon, dönüşüm, depolanma) tanımlanması ve karakterize edilmesi, aerosollerin insan sağlığı üzerindeki etkilerinin incelenmesi için önemlidir (Pöschl, 2005).

2.2.2 Aerosollerin Optik Özellikleri ve Atmosferdeki Etkileri

Doğal ve antropojenik kaynaklı aerosollerin atmosferdeki etkileri aerosol geri saçılması, aerosol soğurulması, aerosollerin doğrudan etkileri ve aerosollerin dolaylı etkileri olmak üzere dört alt başlık altında toplanmaktadır.

2.2.2.1 Aerosol Geri Saçılması

Atmosferde yer alan partiküller ve gazlar, ışınımı yönlendirerek saçılmaya sebep olurlar ve söz konusu saçılım miktarı, ışınım dalga boyu, atmosferde var olan partikül ve gazların yoğunluğu ile ilişkilidir.

Tez konusu Lidar tekniğinde, lazer kaynağından atmosfere gönderilen ışığın atmosferdeki partiküller ile etkileşmesi sonucu çeşitli optik olaylar meydana gelir. Bunlar ışığın yayılımı, saçılımı ve soğurulmasıdır.

Işık partikül ile etkileşimi sonrası, farklı açılarda yansıma meydana gelebilir. Söz konusu yansımanın 180° olması durumuna “geri saçılım” denir. Geri saçılım olayında, gönderilen ışığın frekansında değişim meydana gelmeden, aynı frekansta yansıması durumuna “elastik saçılım”, yansıma sonucu frekansta değişikliğin olması durumuna “elastik olmayan saçılım” denir. Elastik saçılım, elastik olmayan saçılıma göre daha kuvvetli saçılım türüdür.

2.2.2.2 Aerosol Soğurulması

Aerosol soğurulması, atmosferde ışığın aerosoller tarafından emilmesi olayıdır. Aerosollerin soğurulması olayı oldukça karışık bir kavram olduğundan birçok belirsizlik bulunmaktadır. Atmosferik aerosollerin soğurma ölçümlemesi oldukça zordur. Bunun nedeni ise, aerosoller tarafında soğurulan enerjinin, saçılan enerjiden çok daha küçük olmasıdır. Ancak aerosol soğurulma ölçümlemesinin yapılabildiği

bazı teknikler mevcuttur. Söz konusu teknikler, tez konusu ile ilişkin olmamak ile birlikte başlıklarıyla belirtilmektedir. Bu teknikler; filtre metodu, optik akustik spektrometre, ışınsal taşınım geri eldesi, polarimetrik ölçüm teknikleridir (Alexander A. Kokhanovsky, 2008).

Küresel iklim değişikliği çalışmalarında aerosollerin soğurulma katsayı değeri önem taşımaktadır. İklimin soğuma ve ısınmasına etki etmektedir.

Karbon partikülleri ve mineral tozlar gibi belirli atmosferik aerosoller güneş ışınsını soğurarak, yeryüzüne gelen güneş ışınsını azaltır ve atmosferin üst kısımlarında sıcaklığı artırır (R.W. Bergstrom et al., 2007).

Aerosollerin soğurucu özellikleri ile ilgili, siyah karbon kütlesinin anlaşılması (Hansen et al., 1984), aerosol kaynaklarının belirlenmesi (Clarke et al., 2007), siyah karbon ve toz arasındaki farklılığın tespiti (Collaud Coen et al., 2004; Failho et al., 2005; Meloni et al., 2006) ve uydu yardımı ile soğurucu aerosollerin belirlenmesi (Torres et al., 2005) için geçmişte bazı teknikler kullanılarak çalışmalar gerçekleştirilmiştir (R.W. Bergstrom et al., 2007)..

2.2.2.3 Aerosollerin Doğrudan Etkisi

Doğal ve antropojenik kaynaklı atmosferik aerosoller, dünya-atmosfer enerji sistemi üzerinde doğrudan ve dolaylı etkileri ile iklim değişimine sebep olabilmektedir (N. Hatzianastassiou et al., 2007).

Aerosoller, yeryüzüne gelen ışınsını soğurarak ve yansıtarak dünya enerji bütçesinin değişiminde pay sahibidirler (McCormick and Ludwig, 1967; Charlson and Pilat, 1969; Atwater, 1970; Mitchell Jr., 1971; Coakley et al., 1983, H.Yu et al., 2006) ve bu etkileri ile atmosferik sıcaklık yapısına tesir etmektedirler.

Deniz tuzu, çöl tozları, volkanik patlamalar, orman yangınları gibi doğal kaynaklı ve fosil yakıtlarının yakılması veya endüstriyel faaliyetler gibi antropojenik kaynaklı aerosoller, atmosferde yeryüzüne gelen güneş ışınımı soğurma ve saçılma gibi ışımsal zorlamalarının etkisiyle atmosferin soğumasına sebebiyet vermektedir. Özellikle sanayileşmenin artması neticesinde antropojenik kaynaklı kirleticilerin de atmosferde aerosol yığın konsantrasyonunu arttırması ile dünya iklimi üzerinde oldukça büyük değişimlerin meydana geldiği gözlemlenmiştir. Aerosol sayısındaki artış, atmosferin ve yeryüzünün soğuması ile sonuçlanan bulut albedosu ve atmosferden yansımanın artması anlamına gelmektedir (K. R. Allakhverdiev et al., 2009).

2.2.2.4 Aerosollerin Dolaylı Etkileri

Aerosollerin dolaylı etkisi, bulut yoğunlaştırıcı çekirdek (CCN) gibi davranarak, bulut damlacıklarının mikrofiziksel ve optik özelliklerini değiştirmesi olarak tarif edilebilir.

Aerosollerin dolaylı etkileri genellikle iki başlık altında toplanabilir. Birincil dolaylı etki, aerosollerin artması ile damlacık konsantrasyonun artması ve konsantrasyonun artması ile su ile bağlanan damlacık boyutundaki azalmadır (Twomey, 1974). İkinci dolaylı etki ise, bulut damlacık boyutundaki azalmanın yağış verimine, bulut su içeriğine, bulut ömrüne (Albrecht, 1989), bulut yoğunluğuna (Pincus and Baker, 1994) ve dolayısı ile ışınmı yansıtma özelliğine tesir etmesidir.

Atmosferde yer alan bazı partiküller, açık yangınlardan oluşan karbon bileşikli partiküller (Ito and Penner, 2005), dalgalardan oluşan denizel partiküller, kuru topraklardan rüzgar etkisi ile oluşan toz partiküller (Ginoux et al., 2004) gibi birincil partiküllerdir. Bu partiküllerden bazıları bulut yoğunlaşma çekirdeği gibi davranış gösterebilen büyük partiküllerdir (M. Wang and J. E. Penner, 2009). Ancak hidrofobik is partikülleri gibi diğer partiküller ise çözülebilir bir bileşiğe eklenerek, yoğunlaşma ve koagülasyon ile boyutları büyüyerek, bulut yoğunlaşma çekirdeği

gibi davranış gösterebilirler (Rissler et al., 2006). İkincil partiküller ise sülfirik asit gazı ve su buharı gibi gaz fazı türlerinden meydana gelmektedir (Kulmala et al., 2007). Bu tür partiküller nanometre boyutlu partiküllerdir ve bulut yoğunlaştırıcı çekirdek boyutuna gelebilmeleri için önemli bir büyümeye ihtiyaçları vardır (M. Wang ve J. E. Penner, 2009). Birincil ve ikincil partiküllerin bulut yoğunlaşma çekirdeği (CCN) gibi davranış göstermeleri ile bu sayıdaki artış, atmosferde daha fazla suyun daha fazla çekirdek tarafından tutulmasını ve damlacıkların daha küçük boyutlarda olmasına sebep olur. Bu durum bulut ömrünün uzamasına, dolayısı ile bulut varlığı ile yeryüzüne gelen ışınımın soğurulmasına, yansımaya ve bunun neticesi olarak yeryüzünün soğumasına ve yağış oranının düşmesine sebebiyet vermektedir.

Her ne kadar aerosol dolaylı etkileri hakkında çeşitli yorumlar yapılmakta ise de aerosoller hakkındaki belirsizlikler ile aerosollerin atmosferde eşit dağılmamaları ve zamana bağlı konsantrasyonlarındaki büyük değişimler, aerosollerin dolaylı etkilerinin ölçülmesini zorlaştırmaktadır.

2.3 Aerosollerin Mikrofiziksel Özellikleri

Bu bölümde aerosollerin mikrofiziksel özellikleri genel olarak tanıtılmıştır. Söz konusu mikrofiziksel özelliklerin Lidar sistemiyle ölçümleme metotları ve analitik formüller tez çalışmasında detaylı olarak Materyal ve Metot bölümünde verilmiştir.

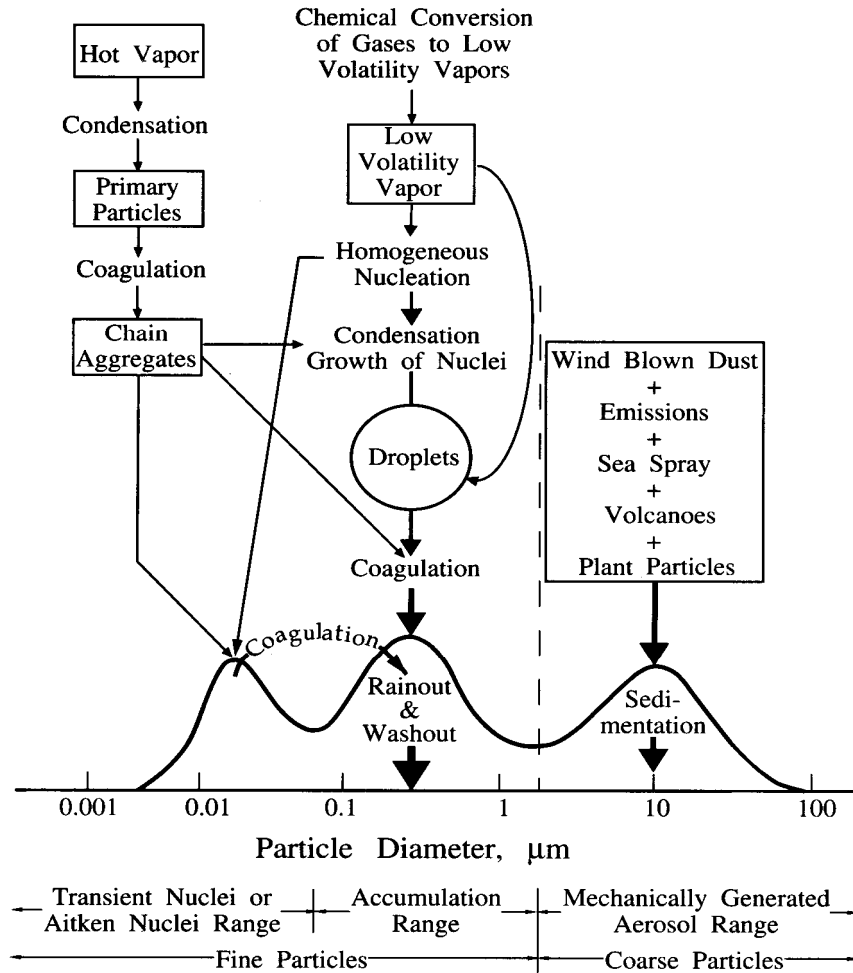
2.3.1 Sayı Yoğunluğu

Birim hacimdeki aerosol sayısıdır. Aerosollerin sayı yoğunluğu, aerosollerin karakterize edilebilmesi açısından önemli bir faktördür. Aerosollerin sayı yoğunluğu bulundukları bölge ve kaynaklarına göre çeşitlilik gösteren, aerosol modellemenin analitik bir ifadesidir. Sayı yoğunluğuna göre aerosollerin atmosferdeki boyut

dağılımları, bulut mikrofiziği, ışımsal zorlama hakkında tespitler gerçekleştirebilmek mümkün olmaktadır.

2.3.2 Yüzey Alanı Yoğunluğu

Birim hacimdeki aerosollerin toplam yüzey alanı olarak ifade edilmektedir. Aerosoller sahip oldukları yüzey alanına göre bulutların fiziksel özelliklerine tesir etmektedirler. Atmosferdeki aerosollerin yüzey alanlarına göre dağılımları Şekil 2.6' da verilmiştir.



Şekil 2.6., Atmosferik aerosollerin idealize edilmiş şematik yüzey alanı dağılımları (Whitby and Cantrell, 1976).

2.3.3 Hacim Yoğunluğu

Birim hacimdeki aerosol hacmidir. Aerosol boyut dağılımında kullanılan bir faktördür. Aerosollerin hacim yoğunluklarının bilinmesi yaşam döngüsü ve atmosferdeki taşınimleri ile ilgili bilgiler vermektedir. Ayrıca partikül hacim yoğunluğundaki değişimler, partiküllerin optik özellikleri, bölgesel ve küresel ısıtım etkilerinin değişimine yol açmaktadır.

2.3.4 Efektif Yarıçap

Aerosol partiküllerinin ortalama yarıçap ağırlıklı alanıdır ve su içeren bulutların ısıtım özelliklerinin hesaplanmasında kullanılan önemli değişkenlerden biridir. Aerosol efektif yarıçapının matematiksel modellemesinde, partikül yarıçapı ve partikül boyut dağılımı önemli bir rol oynamaktadır.

Atmosferik partiküllerin boyutlarının karakterize edilebilmesi için aerosoller üç grupta incelenmektedir: Bunlar, çapı $0,5 \mu\text{m}$ 'den küçük olanlar, çapı $0,5 \mu\text{m}$ ile $2,5 \mu\text{m}$ arasında olanlar ve çapı $2,5 \mu\text{m}$ 'den büyük olanlardır. İlk iki grup ince partiküller olarak adlandırılmaktadır. Endüstriyel kirlilik gibi insan kaynaklı yayılan emisyonlar ince partiküllere örnektir. Çapı $2,5 \mu\text{m}$ 'den büyük olan partiküller ise kaba partiküller olarak adlandırılmaktadır. Sahra Çölü gibi çöl tozları kaba partiküllere örnektir.

2.3.5 Polarizasyon

Bir elektromanyetik dalganın elektrik alan vektörünün doğrultusudur. Her ne kadar ışığın polarize olması doğal bir özelliği olsa da, mikroskopide bu özellik yapay olarak artırılır. Bir ışık demeti değişik frekanslarda dalgalar içerir ve bu frekanslar arasındaki faz ilişkileri ve her düzlemde titreşim görülebilir.

Polarizasyon etkisi, genelde atmosfer optiği ve kısmen aerosol optiği için önemli bir rol oynamaktadır (Gorchakov, 1966). Partiküllerin boyut ve kırınım indisine duyarlıdır. Aynı zamanda yansıtılan ışığın polarizasyon karakteristiği saçılım yapan partiküllerin şekline ve iç yapısına da bağlıdır.

Aerosol çalışmalarında kullanılan Lidar tekniği için polarizasyon olgusu önemli bir olgudur. Lidar tekniğinde, kaynaktan birbirlerine dik, elektrik ve manyetik vektörlere sahip olarak çıkan ışık enine hareketle partikül ile etkileşime girer. Işığın partikülün yüzeyinden yansması ile ışık saçılması meydana gelir. Saçılan ışığın polarizasyonu, partikülün şekline bağlı olarak değiştir. Eğer partikül küresel bir şekle sahip ise polarizasyon değişmez ancak düzensiz bir şekle sahip ise polarizasyon değişir. Bu durum neticesinde atmosferde yer alan partikül maddenin şekil tayini gerçekleştirilir.

2.3.6 Kırınım İndisi

Atmosferik partiküllerin mikrofiziksel parametrelerinin en önemlilerinden biri olan kırınım indisi, bir maddenin parmak izi gibidir. Kırınım indisi, maddenin içeriği (su içerip içermediği ve ne tür bileşikler içerdiği, vb.) hakkında bilgi verir. Bu sebepten dolayı bu parametrenin eldesi ile yorumlama yapılması mümkündür.

Kırınım olayı, ışık hızındaki artma veya eksilme sebebine bağlı olarak meydana gelir. Ancak gerçekte, aerosol parametrelerinin belirlenebilmesi için bazı ekstra kavramlara ihtiyaç duyulmaktadır. Aerosollerin mikrofiziksel özelliklerinin belirlenmesine yardımcı olan bu kavram gerçek ve sanal kavramları içerisinde barındıran kompleks kırınım indisidir. Bu tez çalışmasında kullanılan Lidar tekniğinde kullanılan program ile kırınım indislerinin eldesi mümkündür.

2.4 Aerosollerin Lidar ile Tespit ve Teşhisi

Tezin bu bölümünde lidar tanımlaması, lidar temelleri, çalışma prensibi, lidar ile yapılan aerosol çalışmaları ve lidar ağları hakkında bilgi verilecektir. Saçılım teorileri, fiziksel olaylar hakkında açıklamalar da bu bölüm içerisinde yer alacaktır.

2.4.1 Lidar'ın Tanımı

Lidar cihazının adı, İngilizce dört kelimenin baş harflerinden oluşturulmuş bir kısaltmadır. Light Detection and Ranging (ışıkla algılama ve mesafelendirme) sözcüklerinin kısaltmasıyla adlandırılan Lidar temel olarak üç ana bölümden oluşur. İlki bir ışık kaynağı, ikincisi bu ışığın yansıma ve saçılmalarını toplayan bir teleskop, üçüncüsü ise toplanan sinyalleri anlamlı bilgiye dönüştürecek olan elektronik ve bilgisayar sistemleridir. Günümüzde ışık kaynağı olarak çok çeşitli dalga boylarındaki lazerler kullanılmaktadır. Lazer ışını, hedef bölgeye gönderildiğinde bölgedeki cisimlerle iletişime geçer. Örneğin atmosfer araştırmalarında kullanılan bir Lidar'ın gönderdiği lazer ışını, havadaki parçacıklara çarptığında çeşitli optik etkileşimler meydana gelir. Bu etkileşimler arasında yer alan saçılma ve yansımadan doğan ışık, lidar aygıtının ikinci kısmı olan alıcı teleskop tarafından algılanır ve ışığın geri gelen bu kısmı (çeşitli analiz sistemlerinden de geçirilerek) elektronik sinyallere dönüştürülür.

2.4.2 Lidar Temelleri

Light Detection and Ranging (ışıkla algılama ve mesafelendirme) sözcüklerinin kısaltmasıyla adlandırılan Lidar'ın geçmişi aslında bir hayli eskilere dayanmaktadır. Christian Huelsmeyer'in 1904 yılında geliştirdiği "Telemobiloskop", radar sensörünün ilk halini teşkil etmekteydi. Bir anten, verici ve alıcıya sahip bu sistem, metalik nesneler için, özellikle denizlerde gemilerin çarpışma riskinden uzak durmak için kullanılmaktaydı. Radar'ın temelini teşkil eden bu sistem, günümüz

sistemlerinden çok daha az mesafe olan 3000 metre için kullanılmaktaydı. Bu sistem, tespit edilen bir nesne yörüngesini değiştirene kadar zil çalarak uyarmaktaydı (Lidar uk., Nisan, 2012). Radar sisteminin ilk temelinin atılmasının ardından, sistem çalışma tekniği ilerleyen yıllarda daha da geliştirilmiştir.

Radar çalışma prensibi ile benzer olan lidar sistemlerinin temelleri de bu prensipten yola çıkılarak geliştirilmeye başlanmıştır. Lazerin 1960 yılında keşfinden tam 30 yıl önce, lazer ışını yerine kullanılan projektör lambalarıyla hava yoğunluğunun ölçülmesi için bazı çalışmalar yapılmaktaydı. İlk uygulama, 1938 yılında bulut yüksekliklerinin ölçülmesi için gönderilen ışık darbelerini toplayan bir teleskobun kullanılmasıyla gerçekleşti. Işığın darbeler şeklinde kullanılmasıyla bu sistemler ilk olarak bistatik değil de monostatik olarak kullanılmış oldu, yani ışık kaynağı ve teleskop aynı eksen üzerine yerleştirilebiliyordu. Böylelikle ilk kez Middleton and Spilhaus 1953 yılında ışık kaynağından çıkan ışığın bir hedefe gidişi ve dönüşü arasındaki zaman farkını ölçerek hedefin uzaklığını saptadı ve “LİDAR” kısaltması da aynı yıl doğmuş oldu. 1960’larda lazer teknolojisinin hızla gelişmesiyle ve birçok alanda etkin olarak kullanılmaya başlanmasıyla, atmosferik uygulamalarda lidar kullanılarak aerosol katmanlarının ilk çalışmaları Fiocco ve çalışma arkadaşları tarafından gerçekleştirilmiştir. Fiocco ve Smullin 1963 yılında lazerle atmosferik araştırmalar yapmaya başladı. Bunu takip eden 10 yıl boyunca bütün lidar teknikleri önerildi ve uygulandı. 1971 yılında Witt ve Lundin, 80-84 km yükseklikteki bulutlardan geri saçılım tespitini gerçekleştirmişlerdir (Fiocco and Smullin, 1963; Fiocco and Grams, 1964). 1976 yılında E. D. Hinkler tarafından lidar hakkında ilk ders kitabı yayımlandı. O yıldan sonra lidar hakkındaki gelişmeler optik ve elektronik alanındaki ve özellikle de lazer teknolojisi alanındaki gelişmelere paralel olarak büyümeye ve yaygınlaşmaya devam etti (Wietkamp, 2002). Günümüzde Hubble uzay teleskobunda ve hatta Mars üzerinde bile uygulama alanı bulan lidar tekniği uzaktan algılamanın en önemli aygıtı haline gelmiştir.

2.4.3 Temel Lidar Çalışma Prensibi

Lidar, moleküllerin yoğunluğu ve aerosollerin atmosferik özellikleri hakkında bilgi sağlayan, atmosfer uzaktan algılamada yaygın kullanılan bir tekniktir.

Lidar tekniğinin temeli, elektromanyetik ışınım (ışık) kullanılarak atmosferin aydınlatılması ve saçılan ışığın bir teleskopta toplanmasıdır. Bu tekniğin uygulanmasında kullanılan elektromanyetik ışınım kaynağı lazerdir. Lazer, İngilizcesi “laser” olan ve “Light Amplification of Stimulated Emission Radiation” kelimelerinin baş harflerinden türetilmiş, Türkçesi “Uyarılmış Işıma ile Kuvvetlendirilmiş Işık” anlamına gelmektedir. Kuvvetli ışık kaynağının kullanılması yüksek irtifalardan sinyal alınmasını sağlar.

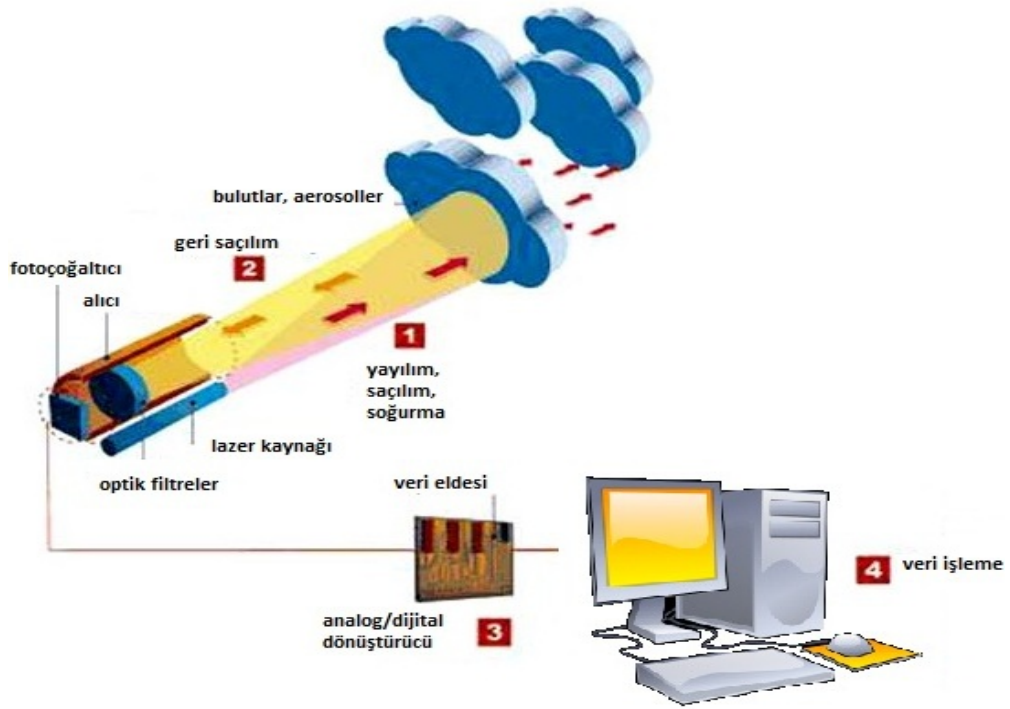
Lidar tekniğinde önceki yıllarda kullanılan ışık kaynağı Ruby lazerlerdi. Günümüzde kullanılmakta olan ışık kaynağı ise genellikle Nd:YAG (neodymium-doped yttrium aluminium garnet) lazerlerdir. Temelde Nd:YAG lazerler ışık saçılımının üç farklı uygulaması için kullanılmaktadır. Bu saçılımlar Rayleigh, Mie ve Raman saçılımlarıdır.

Rayleigh saçılımı atmosferik yoğunluk ölçümleri için kullanılmaktadır. Rayleigh saçılımı, ışığın, kendi dalga boyundan daha küçük tanecikler ile etkileşmesi sonucu söz konusu küçük taneciklerden saçılımını ifade eden bir elastik saçılma (dalga boyunun değişmeden geri ulaşması) türüdür. Rayleigh saçılımını ortaya atan bilim adamı Lord Rayleigh’dir. Lord Rayleigh yaptığı araştırmalarda, ışık saçılımının dalga boylarına göre ışık saçılım derecesinin değiştiğini öne sürmüştür. Bu tezden yola çıkarak, uzun dalga boylu ışığın, kısa dalga boylu ışığa nazaran daha az saçılım gerçekleştirdiği ortaya çıkmaktadır. Söz konusu teze göre, küçük taneciklerin saçılıma uğrattığı ışığın şiddeti, dalga boyunun dördüncü kuvveti ile ters orantılıdır. Rayleigh saçılmasında partikül (veya molekül), ışık ile etkileşimine girmesiyle titreşen bir dipol olarak ele alınabilir (Sienfeld and Pandis, 2006).

Mie saçılımı, Gustav Mie tarafından geliştirilmiştir. Aerosollerin ışık ile etkileşimini inceler. Partiküllerin veya kırılma indisinin düzensizliklerinden dolayı meydana gelen saçılma türüdür (J.D. Klett, 1981). Aynı zamanda Rayleigh saçılımını da içerir. Lidar uygulamasında, Mie saçılımının kullanılması, aerosol konsantrasyonu ve şeklinin (polarizasyon karakteristiğine göre) tespitinde kullanılır.

Raman saçılımı ise, molekülün titreşimsel-rotasyonel enerji seviyelerindeki değişimini içeren elastik olmayan bir saçılım türüdür. Genellikle ışık kaynağından gönderilen ışın moleküllerden elastik bir şekilde saçılır. Ancak bazıları uyarılarak saçılırlar. Bu tür saçılmalarda yayımlanan fotonların frekansları, elastik saçılmaya kıyasla daha düşüktür. Lidar tekniğinde kullanılan lazer kaynağı dalga boylarının 320 nm ve 550 nm aralığında olması, söz konusu teknikte Raman saçılımı uygulaması için verimlidir. Raman saçılımı, atmosferik bileşenlerin ve bölgesel sıcaklığın tespitinde de kullanılır (Kovalev and Eichenger, 2004; Frans Olofson, doctor of philosophy thesis, 2008). Düşük Raman saçılımı kesitleri, atmosferde araştırılmak istenen bileşenlerin yüksek konsantrasyonlarda olmasını gerektirmektedir.

Lidar ölçümü, lazer ışının verici kaynağından çıkması ile başlar. Tarama süresi, taramanın yapılacağı yüksekliğe, ışık hızına ve tarama süresine bağlıdır. Bu sürecin matematiksel formülasyonu $h=ct/2$ 'dir. h yükseliği, c ışık hızını, t ise tarama süresini ifade eder. Işığın, saçılım hacmine ve alıcıya geri dönüşü esnasında yaptığı taşınma sürecinden dolayı, payda 2'dir (Frans Olofson, 2008). Atmosfere gönderilen lazer ışını, atmosferde moleküller ve aerosoller ile etkileşime girer. Moleküller ve aerosollerden geri saçılan ışın bir teleskop (alıcı) sistemi ile toplanarak farklı dalga boylarına sahip optik sistemlere (kanallara) gönderilir. Saçılan ışın, her kanalda dedektör yardımı ile toplanır ve burada foto çoğaltıcılar (photomultiplier) ile gelen veriler elektrik sinyallerine çevrilir. Söz konusu lidar ölçümleme süreçleri Şekil 2.7' de gösterilmiştir.



Şekil 2.7., Lidar ölçümleme süreçleri şematik çizimi

Şekil 2.7’de gösterildiği üzere, lazer kaynağından çıkan lazer ışını, hedef (bulut ve aerosoller) ile etkileşime girmektedir. Bulut ve aerosollerden geri saçılan ışın alıcı (teleskop) tarafından toplanarak, foto çoğaltıcılara gönderilir. Buradan analog/dijital dönüştürücü yardımıyla elde edilen veriler, veri işleme ünitesine yönlendirilir. Lidar sistemine ait süreçler, tezin metod kısmında ele alınmaktadır.

2.4.4 Lidar ile Yapılan Aerosol Çalışmaları

Hava kirlilikleri ve bu kirliliklere bağlı atmosferde yer alan havada asılı maddeler hakkında çalışmaların iyice önem kazanması ile birlikte, ölçümleme metotları ve geliştirilen teknikler de önem kazanmıştır. Bunlardan biri de lidar tekniğidir.

Örnek olarak tozlar dünya ışımsal bütçesinde çok önemli bir rol almaktadır (Sokolik et al., 2001). Atmosferin sıcaklık, kimyasal bileşimi ve dinamikleri üzerindeki etkileri ile devamlı izlenmesi ve boyutlarına bağlı olarak optik

özelliklerinin incelenmesi gerekmektedir. Söz konusu incelemelerde elastik saçılma (Liu et al., 2008), aerosol ışın azalımı ve geri saçılımın katsayılarını hesaplamaya izin veren, toz partiküllerinin özelliklerini karakterize edebilen, Raman ve yüksek spektral çözünürlüklü lidarlar (HSRL) kullanılmaktadır (Ansmann et al., 1992, De Tomassi et al., 2003, Xie et al., 2008). Bir örnek ile içerisinde Raman ve HSRL’nda yer aldığı lidar parkını kullanarak, toz partiküllerinin özellikleri, Sahra mineral toz deneyinde tespit edilmiştir (Heintzenberg et al., 2009; Ansmann et al., 2009; Esselborn et al., 2009; Freudenthaler et al., 2009; Tesche et al., 2009; Wiegner et al., 2009).

Lidar ile yapılan aerosol çalışmalarında karşılaşılan önemli bir problem, partikül şekline göre geri saçılımın olmasıdır. Benzer durum, laboratuvar çalışmalarında partiküllerin karakterizasyonunu karmaşıklaştıran aerosollerin örnekleme içinde geçerlidir (Haywood et al., 2003; Tanre et al., 2003). Partiküllerin çeşitli geometrik şekillerinin ve morfolojilerinin çalışmaları yıllarca çalışılmıştır. Bu çalışmaların neticesinde bazı özel geometrik şekillere sahip partiküllerin, elektromanyetik alandaki etkileşimi hakkında bir çözüm bulunmuştur (Mischenko et al., 2000; Mischenko et al., 2002).

Bu problemin üstesinden gelmek amacı ile küresel olmayan aerosol modellemesi gerçekleştirilmiştir. Bu modellemede küreye benzer cisimler kullanılarak laboratuvarlarda Sahra tozunun laboratuvar çalışmaları gerçekleştirilmiştir (Mischenko et al., 1995). Daha önceki çalışmalarda, partiküllerin küresel olmama ihtimali göz ardı edilerek ölçümler yapılmaktaydı. Ancak yapılan bu modelleme, partiküllerin küresel olmama ihtimalini de göz önünde bulundurarak ölçümler gerçekleştirilmeye imkan sağlamıştır. Bu çalışmayı takiben laboratuvar çalışmalarında kullanılan söz konusu modelleme, lidar sistemlerine de adapte edilmiştir.

Aerosollerin geri saçılma etki eden en önemli faktörü, sahip oldukları nem çekme özellikleridir. Nem çekme özelliği olan aerosoller, bağıl nemin artışı ile su buharını bünyelerinde tutmaları ve bunun neticesi olarak partikül boyutunda artışa

sebebiyet vermesidir. Partikül boyutundaki artış, saçılımda da artışa sebebiyet vermektedir (Hanel, 1976). Laboratuvar ortamında, aerosollerin saçılımları ile bağıl nem arasındaki ilişkiyi irdeleyen çokça çalışma gerçekleştirilmiştir. Lidar ile söz konusu çalışmayı gerçekleştirmenin avantajı, aerosollere ve çevrelerine etki etmeden, uzaktan algılama yöntemi ile belirli bir irtifada aerosollerin fiziksel özelliklerinin ölçümlenebilmesidir.

Partikül nem çekme özelliğine bağlı olarak lidar geri saçılımı ile ilgili çalışmalar bundan 40 yıl önce çalışılmaya başlanmıştır (MacKinnon, 1969). Bu çalışmayı takiben günümüze kadar çok sayıda çalışmalar gerçekleştirilmiştir (Feingold and Morley, 2003; Pahlow et al. 2006; Cuesta et al., 2008). Söz konusu çalışmalarda tek dalga boylu veya çok dalga boylu Raman lidar kullanılmaktadır.

Hidrofilik aerosoller ile su buharının bağlanması sonucunda aerosol yarıçapı artar. Daha fazla su buharının daha fazla hidrofilik aerosoller ile bağlanması neticesinde bulut oluşumu meydana gelir. Çok dalgalı lidar metodu ile aerosollerin bulut yoğunlaştırıcı çekirdek gibi davranış göstermeleri yıllar önce göz önüne alınmışsa da (Feingold and Grund, 1994), deneysel çalışmalar son yıllarda gerçekleştirilmiştir (Müller et al., 2002).

2.4.5 Dünyadaki Lidar Ağları

Aerosollerin zamansal ve mekansal dağılımlarını anlayabilmek amaçlı çoklu lidar istasyonlarından aerosol ölçümlmelerini gerçekleştirebilmek çok önemlidir. Bu amaçtan yola çıkarak dünyada çeşitli lidar ağları kurulmuştur. Ancak bu lidar ağlarından sadece bir kaçı başarılı bir çalışma düzeyine gelmişlerdir.

EARLINET (European Aerosol Research Lidar Network) ağının amacı, aerosollerin dikey, yatay ve zamansal dağılımlarının eş zamanlı ölçümlmeler ile sayısal değerlendirilmelerinin yapılmasıdır. Söz konusu ölçümlmelerin çoğu Avrupa'da yer alan lidar ağlarının eş zamanlı ölçümlmeleri, planlanmış olan belirli

bir tarihe göre gerçekleştirmeleri ile büyük bir başarı ile gerçekleşmektedir. Volkanik patlamalar gibi doğal afetlerden kaynaklanan ek ölçümler de yine bu ağ sisteminde gerçekleştirilebilmektedir.

EARLINET Lidar ağına bağlı istasyonlar Tromsö, Norveç; Atina, Teseloniki, Oksilithos, Yunanistan; Granada, Barselona, Madrid, İspanya; Belsk, Polonya; Bilthoven, Hollanda; Bükreş, Romanya; Evora, Portekiz; Garmisch, Gerschekirschen, Leipzig, Münih, Hamburg, Almanya; Ispra, Potenza, Lecce, Napoli, İtalya; Neuchatel, Payerne, İsviçre; Likoping, İsveç; Minsk, Belarus; Sofya, Bulgaristan; Palaisue, San Michel, Fransa'dır. İsimleri belirtilen ülkelere ait istasyonlara yeni bir üye olarak, TÜBİTAK Marmara Araştırma Merkezi'nde kurulan Lidar Laboratuvarı da katılmıştır.

MPLNET (Micro-Pulse Lidar Network), aerosol ve bulut dikey yapısını ölçümleyen, mikro darbeli lidar sistemler birleşmiş ağıdır. İklim değişikliği ve aerosol modelleme için uzun ölçümler gerçekleştirilmektedirler. NASA, AERONET (Aerosol Robotic Network) ile işbirliği yaparak, boyut dağılımı, aerosol ve bulut yükseklikleri, gezegen sınır tabakası yapısı ve geri saçılım değerlendirmelerini gerçekleştirmektedirler.

Yukarıda da bahsedildiği üzere başarılı çalışmalar gerçekleştirmekte olan Lidar ağlarının en önemlileri EARLINET ve MPLNET lidar ağlarıdır. Halihazırda çalışmalarını geliştirmekte olan diğer lidar ağları ise, Asya Toz Ağı (AD-Net), Amerikan Lidar Ağı (ALINE), Atmosferik Kompozisyon Değişimi Algılama için Uluslararası Ağ (NDACC), Bölgesel Doğu Aerosol Lidar Mesonet (REALM) ağlarıdır.

2.5 Gebze Bölgesi Coğrafi Konumlar ve Kirleticiler

Kocaeli il sınırları içerisinde yer alan ve Kocaeli ili'nin kuzeybatısında bulunan Gebze ilçesi, 29° 15" ve 29° 30 " kuzey enlemleri ile 40° 45 " ve 41° 00 " doğu

boylamları arasında bulunmaktadır. İlçe güneyinde İzmit Körfezi, doğusunda Körfez ilçesi, kuzey ve kuzey batısında İstanbul yer almaktadır.

Ülkemizdeki sanayi kuruluşlarının % 17'sini sınırları içerisinde barındıran Kocaeli ilinde, 1. sınıf, 2. sınıf ve 3. sınıf olmak üzere toplamda 7400 civarında sanayi kuruluşu yer almaktadır. Söz konusu sanayi kuruluşlarının %56,9' u ise Gebze ilçe sınırları içerisinde yer almaktadır. Sahip olduğu sanayi kuruluşlarının yoğunluğu ve karayollarının da etkisi göz önüne alınarak, Kocaeli ili tüm merkez ve ilçeleri dahil olmak üzere yoğun kirliliğin olduğu bir bölgedir. Kocaeli ili, 2005 yılı Hava Kirliliği Kontrolü Genelgesinde 1. Grup kirlilik sınıfında yer almaktadır.

İlde endüstriyel hava kirliliği, baca gazlarından kaynaklanan genel kirleticiler ile sanayinin şekli ve türüne göre organik ve inorganik diğer kirleticilerden kaynaklanmaktadır. Dokuz Eylül Mühendislik Fakültesi tarafından yapılan bir çalışmada sanayiden kaynaklanan kazan bacaları toplam emisyon değerleri Çizelge 3.1'de verilmiştir.

Çizelge 3.1., Kazan bacaları toplam emisyon değerleri (dilovası.org, 30.04.2011, 14:15).

CO emisyonu	992,54 ton/yıl
Nox	2.330,48 ton/yıl
HIC	71.765,90 ton/yıl
Partikül emisyonu	26.606,36 ton/yıl
Sox	287,06 ton/yıl

En fazla kirliliği yaratan metal, kimya, kağıt, petrol ve petrol ürünleri sektöründe olan sanayi kuruluşlarıdır.

Geçmiş yıllarda (2006 yılı değerlendirmesi) Gebze ve Dilovası'nda yapılan PM (Partikül Madde) ve SO₂ (Kükürt dioksit) ölçümlerine göre en fazla PM değeri

Gebze'de Şubat ayında 69 mg/m^3 , Dilovası'nda Ağustos ayında 55 mg/m^3 'tür. En fazla SO_2 değeri Gebze'de Şubat ayında 218 mg/m^3 , Dilovası'nda ise Ocak ayında 152 mg/m^3 olarak tespit edilmiştir.

Çizelge 3.2., Gebze ve Dilovası ilçeleri aylık PM ve SO_2 değerleri (dilovası.org, 30.04.2011, 14:30).

AYLAR	GEBZE		DİLOVASI	
	PM	SO_2	PM	SO_2
Ocak	42	183	31	152
Şubat	69	218	36	122
Mart	50	100	34	111
Nisan	26	99	23	91
Mayıs	13	65	12	77
Haziran	11	59	11	63
Temmuz	10	63	10	47
Ağustos	---	---	55	10
Eylül	26	99	23	91
Ekim	16	19	13	40
Kasım	37	54	39	96
Aralık	47	27	51	49
Kış Dön.Ort	43	100	34	95
Yıllık Ortalama	33,5	99	31	79

Kocaeli ili genelinde sekizi aktif olmak üzere 15 adet Organize Sanayi Bölgesi (OSB), iki adet serbest bölge ve ikisi aktif durumda olan dört Teknopark bulunmaktadır ve OSB'lerin üçte birinin Dilovası bölgesine yerleştiği izlenmektedir. Bölgede bir tanesi faal (Dilovası Organize Sanayi Bölgesi) diğerleri yapım aşamasında olan toplam beş ayrı OSB ve bir de küçük sanayi sitesi bulunmaktadır. Altyapı çalışmaları süren organize sanayi bölgeleri arasında kimya, makine, mermer ve kömür organize sanayi bölgeleri yer almaktadır (Türk Tabipler Birliği Dilovası Raporu, Ocak 2012). Dilovası ilçesi, cam sanayi, temel kimya ve plastik, boya sanayi, demir-çelik ve döküm sanayi, madeni eşya ve araç gereç yapımı sanayi, motorlu taşıt yapımı sanayi, sanayiye ait elektrikli cihazlar yapımı, sanayi, dokuma, ağaç, yedek parça sanayi, olmak üzere öne çıkan büyük sanayi kuruluşlarına sahiptir. Özellikle son yıllarda Kocaeli iline bağlı, Kocaeli Yarımadası'nın güney kıyı şehri, limanlar, devlet demiryolları ve ülkemizin iki büyük karayolu olan D-100 ve TEM

otoyollarına komşu olan Dilovası ilçesi, yaşanan kanser vakalarına bağlı olarak ölüm oranlarının artması ile dikkat çekmektedir. Sağlık Bakanlığı'nın 2004 yılına ait yaptığı bir çalışmada, bölgede varolan kanser ölüm vakalarının Türkiye ortalamasının üç katı olduğu gerçeği ise bölgedeki hava kirliliğinin somut bir göstergesi olmuştur.

Söz konusu tez çalışmasında, Gebze bölgesi civarı ve özellikle Dilovası bölgesindeki sanayi, antropojenik ve doğal kaynaklı aerosol formundaki hava kirliliklerinin uzaktan algılama yöntemine bağlı olarak, farklı dönemlerde Lidar sistemi ile ölçümlenmesi gerçekleştirilmiştir. Söz konusu ölçümlerlerden elde edilen bilgiler ile geri saçılım ve ışın azalımı katsayıları (Raman ve Klett metodları ile) ve bazı durumlarda polarizasyon ve renk haritaları çıkartılarak, değerlendirmeler yapılmıştır.

3. MATERYAL VE METOT

Bu bölümde öncelikle, lidar ile aerosollerin incelenebilmesi amacıyla kullanılması gereken matematiksel formüller verilmiştir. Buna ek olarak, aerosol gerisaçılımını ve ışın azalımı katsayılarını geri kazanmak amacıyla lidar denkleminin çözümü açıklanmıştır. Bunun için kullanılan Klett ve Raman yöntemleri de detaylı şekilde anlatılmıştır. Ayrıca partikül parametrelerini geri kazanmak amacıyla kullanılan düzenleme ile tersine çevirme (inversion with regularization) metodu açıklanmıştır.

Lidar sistemi teorik olarak anlatıldıktan sonra, deney düzeneği, sistem parçalarının alındığı tedarikçi firmalarını da içeren bilgilendirme ve lidar sisteminin teknik özellikleri listelenmiştir. Buna ek olarak veri değerlendirme, gürültü (noise) eliminasyonu ve veri zamanlama yöntemi bu bölümde açıklanmıştır.

3.1 Aerosol Saçılım Katsayıları ve Lidar Denklemi

355 nm’de bulunan elastik gerisaçılım sinyalinin ve 387 nm’de bulunan Azot elastik olmayan sinyalinin ölçümü, ışın azalımı ve gerisaçılım katsayılarının birbirinden bağımsız şekilde belirlenmesine olanak vermektedir. Bu şekilde lidar oranı adı verilen ışın azalımının geri saçılma oranı belirlenmektedir. Partikül ışın azalımı katsayısı elastik olmayan gerisaçılım sinyali profilinden, partikül geri saçılım katsayısı ise elastik geri saçılımının Raman sinyaline oranı ile belirlenmektedir (Ansmann et al., 1992).

Elastik geri saçılım sinyali için kullanılan temel lidar denklemi aşağıdaki şekildedir:

$$P_{\lambda_L}(z) = P_{0,\lambda_L} A_{\lambda_L} \frac{\beta_{\lambda_L}^m(z) + \beta_{\lambda_L}^a(z)}{z^2} \exp\left(-2 \int_0^z (\alpha_{\lambda_L}^m(z') + \alpha_{\lambda_L}^a(z')) dz'\right) \quad (3.1)$$

P_{0,λ_L} , λ_L dalga boyundaki lazer enerjisini, A_{λ_L} , λ_L dalga boyundaki sistem sabitini, $\beta_{\lambda_L}^m(z)$ moleküler atmosfer (N_2 , O_2 ve diğer gazlar) için gerisaçılımı, $\beta_{\lambda_L}^a(z)$ aerosol gerisaçılımını, z mesafeyi, $\alpha_{\lambda_L}^m(z)$ moleküler atmosfer için ışın azalımını, $\alpha_{\lambda_L}^a(z)$ ise aerosol ışın azalımını ifade etmektedir.

Elastik olmayan Raman gerisaçılım sinyali için ise aşağıda verilen formül kullanılmaktadır:

$$P_{\lambda_R}(z) = P_{0,\lambda_R} A_{\lambda_R} N(z) \frac{\sigma_{\pi,\lambda_R}}{z^2} \exp \left(- \int_0^z \left(\alpha_{\lambda_R}^m(z') + \alpha_{\lambda_R}^a(z') + \alpha_{\lambda_L}^m(z') + \alpha_{\lambda_L}^a(z') \right) dz' \right) \quad (3.2)$$

$\alpha_{\lambda_R}^m(z)$, λ_R Raman dalga boyundaki moleküler atmosfer için ışın azalımı katsayısını, $N(z)$ moleküler Azot'un konsantrasyonunu, σ_{π,λ_R} moleküler Azot ve Oksijen'in tersi yönündeki kesitini, $\alpha_{\lambda_R}^a(z)$, λ_R Raman dalga boyundaki aerosol için ışın azalımı katsayısını, $\alpha_{\lambda}^m(z)$ lazer radyasyon dalga boyundaki moleküler atmosfer için ışın azalımı katsayısını, $\alpha_{\lambda}^a(z)$ lazer radyasyon dalga boyundaki aerosol için ışın azalımı katsayısını göstermektedir.

Aşağıda verilen Angstrom denklemi, ortalama partikül sayısının ya da partiküllerin ortalama yarıçaplarının hesaplanmasında kolaylık sağlamaktadır.

$$\alpha_{\lambda_R}^a = \alpha_{\lambda_L}^a \left(\frac{\lambda_L}{\lambda_R} \right)^k \quad (3.3)$$

Angstrom denklemindeki k , Angstrom sabitini ifade etmektedir. Küçük partiküller için k değerinin yaklaşık olarak 4 olduğu, büyük partiküller için 0 olduğu, bulutlar için ise negatif değer aldığı bilinmektedir.

3.2 Lidar Denkleminin Çözümü

Lidar denkleminin çözümü için Klett ve Raman metotları olmak üzere iki yöntem kullanılmaktadır. Klett metodu (Klett, 1981) sabit lidar oranı varsayımına dayanmaktadır:

$$\frac{\beta(z)}{\alpha(z)} = P \quad (3.4)$$

Lidar denkleminin Klett çözümü aşağıda verilmektedir:

$$P_{\lambda_L}(z) = P_{0,\lambda_L} A_{\lambda_L} \frac{\beta_{\lambda_L}^m(z) + \beta_{\lambda_L}^a(z)}{z^2} \exp\left(-2 \int_0^z (\alpha_{\lambda_L}^m(z') + \alpha_{\lambda_L}^a(z')) dz'\right) \quad (3.5a)$$

$$z^2 P_{\lambda_L}(z) = P_{0,\lambda_L} A_{\lambda_L} (\beta_{\lambda_L}^m(z) + \beta_{\lambda_L}^a(z)) \exp\left(-2 \int_0^z (\alpha_{\lambda_L}^m(z') + \alpha_{\lambda_L}^a(z')) dz'\right) \quad (3.5b)$$

$$\ln(z^2 P_{\lambda_L}(z)) = \ln(P_{0,\lambda_L} A_{\lambda_L} (\beta_{\lambda_L}^m(z) + \beta_{\lambda_L}^a(z))) - 2 \int_0^z (\alpha_{\lambda_L}^m(z') + \alpha_{\lambda_L}^a(z')) dz' \quad (3.5c)$$

(3.5) denkleminin çözümü aşağıdaki şekilde gösterilmektedir:

$$S(z) = \ln(z^2 P(z)) \quad (3.6)$$

Bu ifade, lidar denkleminin logaritmasının farklı bir formül ile gösterimidir. $S = S(z)$ ve $S_0 = S(z_{ref})$ gösteriminde bulunan z_{ref} atmosferin aerosol içermeyip sadece molekülleri içerdiği referans mesafeyi ya da mesafeyi ifade etmektedir. Denklem tekrar yazıldığında ya da referans mesafe kavramı ile birleştirilip çözüldüğünde aşağıdaki şekilde olmaktadır:

$$S - S_0 = \ln[\beta(z)/\beta(z_0)] - 2 \int_{z_0}^z \alpha(z') dz' \quad (3.7)$$

$$\frac{dS}{dz} = \frac{1}{\beta(z)} \frac{d\beta(z)}{dz} - 2\alpha(z) \quad (3.8)$$

3.8 diferansiyel denkleminin çözümü aşağıdaki şekildedir:

$$\alpha(z) = \frac{\exp[(S - S_0)]}{\alpha_0^{-1} - 2 \int_{z_0}^z \exp[(S - S_0)] dz'} \quad (3.9)$$

Bu formülde bulunan $\alpha(z)$ aerosol ışın azalımı katsayısını ifade etmektedir. 3.9 denklemi 3.4 denkleminde yerine koyulduğunda gerisaçılım ışın azalımı katsayısı denklemi elde edilmektedir:

$$\beta(z) = P^m \alpha^m(z) + P^a \alpha^a(z) \quad (3.10)$$

Bu formülde bulunan $\beta(z)$ gerisaçılım katsayısını, $P^m = \frac{3}{8\pi}$ moleküler lidar oranını, P^a ise aerosol lidar oranını göstermektedir.

Partikül ışın azalımı katsayısı Raman yöntemi kullanılarak azot Raman sinyalinin elde edilmektedir (Ansmann, 1992).

$$\alpha_{\lambda_L}^a(z) = \frac{\frac{d}{dz} \left(\ln \frac{N(z)}{P_{\lambda_R}(z) z^2} \right) - \alpha_{\lambda_R}^m(z) - \alpha_{\lambda_L}^m(z)}{1 + \left(\frac{\lambda_L}{\lambda_R} \right)^k} \quad (3.11)$$

Burada partikül saçılımının aşağıdaki denkleme eşit olduğu farz edilmektedir.

$$\alpha_{\lambda_R}^a = \alpha_{\lambda_L}^a \left(\frac{\lambda_L}{\lambda_R} \right)^k \quad (3.12)$$

Partikül gerisaçılım katsayısı $\beta_{\lambda_L}^a(z)$ elastik ve inelastik gerisaçılım sinyalleri kullanılarak belirlenmektedir. z yüksekliğinde ve z_{ref} referans yüksekliğinde ölçülmüş iki sinyal çiftine $P_{\lambda_L}(z)$ ve $P_{\lambda_R}(z)$ ihtiyaç bulunmaktadır.

$$\beta_{\lambda_L}^a(z) = -\beta_{\lambda_L}^m(z) + \frac{P_{\lambda_R}(z_{ref})P_{\lambda_L}(z)N(z)}{P_{\lambda_L}(z_{ref})P_{\lambda_R}(z)N(z_{ref})} \beta_{\lambda_L}^m(z_{ref}) \times \frac{\exp\left(-\int_{z_{ref}}^z \alpha_{\lambda_R}^m(z') + \alpha_{\lambda_R}^a(z') dz'\right)}{\exp\left(-\int_{z_{ref}}^z \alpha_{\lambda_L}^m(z') + \alpha_{\lambda_L}^a(z') dz'\right)} \quad (3.13)$$

Bu formülde bulunan $P_{\lambda_R}(z_{ref})$ Raman dalga boyu için z_{ref} mesafesindeki lidar sinyalinin gücünü, $P_{\lambda_L}(z_{ref})$ elastik dalgaboyu için z_{ref} mesafesindeki lidar sinyalinin gücünü, $N(z_{ref})$ ise Raman dalga boyu için z_{ref} mesafesindeki moleküler Azot konsantrasyonunu göstermektedir.

3.2.1 Düzenleme ile Tersine Çevirme (Inversion with Regularization)

Ters problem, lidar verilerinden partikül mikrofiziksel parametrelerinin geri kazanılması amacıyla, Fredolm integral denklemi şeklinde formüle edilmiştir (Veselovskii et al., 2002). Aşağıda verilen denklemler aerosol gerisaçılım ve ışın azalımı katsayılarını göstermektedir:

$$\beta_i = \int_0^{\infty} K_{\beta}(m, r, \lambda_i) f(r) dr \quad (3.14)$$

$$\alpha_i = \int_0^{\infty} K_{\alpha}(m, r, \lambda_i) f(r) dr \quad (3.15)$$

Bu formüllerde bulunan r partikül yarıçapını, m_R gerçek kısmı ile m_I sanal kısmına sahip karmaşık sayı $m = m_R - im_I$ kompleks partikül kırılma indisini, $K_{\beta}(m, r, \lambda_i)$ ve $K_{\alpha}(m, r, \lambda_i)$ küresel şekle sahip partikül durumunda Mie Teorisi'ne göre hesaplanabilen gerisaçılım ve ışın azalımı temel fonksiyonlarını göstermektedir (Bohren and Huffman, 1983). $f(r)$ terimi, r ve $r+dr$ arasında hacim başına partikül sayısını gösteren PSD (particle size density) şeklinde ifade edilmektedir. Bu nedenle, (3.14) ve (3.15)'teki formüller aşağıdaki genel integral denklemi şeklinde yazılabilmektedir.

$$g_j(\lambda_i) = \int_{r_{\min}}^{r_{\max}} K_j(m, r, \lambda_i) f(r) dr \quad (3.16)$$

Bu denklemde bulunan j is α ya da β (ışın azalımı ya da gerisaçılım katsayısını), $g_j(\lambda_i)$ λ_i dalga boyundaki optik veriyi, $r_{\min}$ ve $r_{\max}$ ise partikül yarıçaplarının alt ve üst limitlerini belirtmektedir (Veselovskii et al., 2002).

3.16 denkleminin herhangi bir analitik çözümü bulunmamaktadır. Bu nedenle, diğer çalışmalarda düzenleme ile tersine çevirme (inversion with regularization) yöntemi ayrıntılı olarak açıklanmaktadır (Twomey, 1977; Tikhonov and Arsenin, 1977). Bu yaklaşımda 3.16 denklemi aşağıdaki şekilde tekrar yazılabilmektedir.

$$g_p^{\delta} = \int_{r_{\min}}^{r_{\max}} K_p(m, r) f^{\delta}(r) dr \quad (3.17)$$

Bu formülde bulunan g_p^δ bozulmuş optik veri (α ya da β), $f^\delta(r)$ PSD'yi ve $p=j$, λ 'yi ifade eden ilgili fonksiyonu göstermektedir. (3.17) integral denklemi $B_j(r)$ taban fonksiyonlarının süperpozisyonundan meydana gelen toplama ile yaklaştırılmaktadır.

$$f^\delta(r) = \tilde{f}^\delta(r) + \varepsilon = \sum_j C_j B_j(r) dr + \varepsilon \quad (3.18)$$

Denklemde yer alan $\tilde{f}^\delta(r)$ terimi (3.18) denkleminin yaklaşık çözümü, ε çözümdeki hata, C_j ise ağırlık katsayıları adı verilen sabitlerdir. $B_j(r)$ ise bu durumda üçgen şeklinde olan B-spline fonksiyonudur (Veselovskii et al., 2002). Bahsedilen fonksiyonlar aşağıdaki anlatımda verilmektedir:

$$B_j(r) = \begin{cases} 0 & ; r < r_{j-1} \\ 1 - \frac{r_j - r}{r_j - r_{j-1}} & ; r_{j-1} < r \leq r_j \\ 1 - \frac{r - r_j}{r_{j+1} - r_j} & ; r_j < r \leq r_{j+1} \\ 0 & ; r > r_{j+1} \end{cases} \quad j=1..N \quad (3.19)$$

Bu formülde yer alan r_0 ve r_{N+1} içinde inversiyonun gerçekleştiği boyut aralığını sınırlandırmaktadır. Bir sonraki denklemde bu aralık, inversiyon penceresi olarak ifade edilmektedir. Buna ek olarak (3.19) denkleminde bulunan N , B-spline fonksiyonlarının sayısını göstermektedir. r_j noktaları ise $[r_0, r_{N+1}]$ aralığında eşit olarak ayrılmıştır. Bu algoritmada N , her zaman optik veriler ile denk düşmektedir (Veselovskii et al., 2002).

(3.18) ve (3.19) denklemleri kullanılarak, optik veriler bir lineer kombinasyon olarak yeniden yazılabilmektedir:

$$g_p^\delta = \sum_{j=1}^N A_{pj}(m) C_j + \varepsilon^\nabla, \quad (3.20)$$

Bu formülde yer alan A_{pj} ve ε^∇ temel fonksiyonlardan, alt fonksiyonlardan ve hatalardan hesaplanmaktadır:

$$A_{pj}(m) = \int_{r_{\min}}^{r_{\max}} K_p(m, r) B_j(r) dr, \quad (3.21)$$

$$\varepsilon_p^\nabla = \int_{r_{\min}}^{r_{\max}} K_p(m, r) \varepsilon(r) dr. \quad (3.22)$$

Optik veri $\bar{g}^\delta = [g_p^\delta]$ vektörü, ağırlık katsayıları ise $\bar{C} = [C_j]$ vektörü, hatalar da $\bar{\varepsilon}^\nabla = [\varepsilon_p^\nabla]$ vektörü şeklinde yazıldığında (3.20) denklemi aşağıdaki vektör-matris şeklinde yazılabilmektedir:

$$\bar{g}^\delta = A \bar{C} + \bar{\varepsilon}^\nabla, \quad (3.23)$$

$A = [A_{pj}]$ matrisi ağırlık matrisi olarak adlandırılmaktadır ve elementleri (3.21) denkleminde hesaplanmaktadır (Veselovskii et al., 2002).

(3.23) denkleminin çözümü ağırlık katsayılarının vektörünü vermektedir:

$$\bar{C} = A^{-1} \bar{g}^\delta + \bar{\varepsilon}, \quad (3.24)$$

Bu formülde yer alan $\bar{\varepsilon} = -A^{-1} \bar{\varepsilon}^\nabla$ hata vektörü, A^{-1} ise matris A 'nın tersidir. Bu nedenle, inversiyon problemi, C_j ağırlık katsayılarını belirleme problemi haline dönüşmektedir.

Bundan sonra, genel olarak (3.24) denkleminin basit çözümü sabit olmamaktadır. Bunun sonucunda, f için kesin çözümü yeniden belirlemek mümkün olmamaktadır. Bu nedenle sabit olmama durumu düzenleme yapılar bastırılmaktadır. Bu da denklem (3.14)'ün aşağıdaki operatör şeklinde yazılması ile ifade edilmektedir (Twomey, 1977):

$$\hat{A} f = g \quad (3.25)$$

g kesin değerinin ve the approximate value g^δ yaklaşık değerinin bilinmesi durumunda:

$$\|g - g^\delta\|_E \leq \delta \quad (3.26)$$

Düzenleme yönteminin esası, (g^δ, δ) çiftine uygun olan $\tilde{f}^\delta$ değerini belirleyen algoritmanın oluşturulmasına bağlıdır ve $\tilde{f}^\delta \xrightarrow{\delta \rightarrow 0} f$ yakınsaklığı uygulanmaktadır (Veselovskii et al., 2002).

Tikhonov (1977)'a göre $M^\gamma[f, g^\delta]$ aşağıdaki şekilde tanımlanmaktadır:

$$M^\gamma[f, g^\delta] = \|\hat{A} f - g^\delta\|_E^2 + \gamma \Gamma(f), \quad (3.27)$$

Bu denklemde yer alan $\rho' = \|\hat{A} f - g^\delta\|_E^2$ fark, γ negatif olmayan düzenleme parametresi ya da Lagrange çarpanı, $\Gamma(f)$ ise ters problemi sabit hale getiren terimdir.

(3.25) denkleminin çözümü $M^\gamma[\tilde{f}_\gamma^\delta, g^\delta] \longrightarrow \min$ yaklaşımının minimizasyonu ile belirlenmektedir. Matris-vektör halinde ise aşağıdaki şekilde yazılmaktadır:

$$A^T A \bar{C} - A^T g^\delta + \gamma H = 0 \quad (3.28)$$

Bu nedenle ağırlık katsayıları aşağıdaki ilişkiden kaynaklanmaktadır:

$$\bar{C} = (A^T A + \gamma H)^{-1} A^T g^\delta \quad (3.29)$$

(3.24) ile (3.29) denklemleri arasındaki temel fark, boyut dağılımları küçük partikül boyutu aralıklarında geniş salınımlar göstermeyen fiziksel koşulu tanımlamaktadır ve düzeltme matrisi olarak adlandırılmaktadır (Twomey, 1977). Matrisin spesifik hali, art arda gelen alt fonksiyonların ağırlık faktörleri arasındaki maksimum farkı etkilemektedir. Bu matris, birbirini izleyen üç alt fonksiyonun ağırlık faktörlerinde meydana gelen değişimi tanımlamaktadır ve ikinci türevdeki çözümün düzgünlüğüne eş değerdir (Dubovik et al., 2000).

0'dan ∞ 'ye kadar değer alabilen Lagrange çarpanı γ , düzeltme derecesini ya da düzeltme matrisinin kuvvetini belirlemektedir. Lagrange çarpanı seçimi için genellikle maksimum olabilirlik metotları olan farklı yöntemler bulunmaktadır. Genelleştirilmiş çapraz geçerlilik ve minimum farklılık prensibi yöntemi olan Bayesian yaklaşımı kullanılmaktadır. Kriterler arasında en basiti ve doğal olanı olması nedeniyle minimum farklılık yöntemi seçilmektedir (Veselovskii et al., 2002). Minimum farklılık yönteminin uygulanmasındaki temel problem, verideki olması beklenen hatanın önceden bilinmesinin gerekliliğidir. Aksi takdirde, $\gamma \rightarrow 0$ için en küçük farklılık gözlemlenmektedir ve bu durumda $-\infty$ ile $+\infty$ arasında salınım göstermektedir. Sonuçların pozitif olmasının gerekliliği nedeniyle bu durum için, bu yöntem üzerinde değişiklik yapılmalıdır. Daha önce negatif olmama koşulu ihtimali değerlendirilmiştir (Dubovik et al., 2000). Üzerinde değişiklik yapılmış farklılıkta, $\rho = \|A|f^\delta - g^\delta\|$ koşulunun (3.23) fonksiyonunu en aza indirdiği modüller $|f^\delta|$ çözüm olarak kabul edilmektedir. Küçük γ değeri için, γ değerinin artması ile ρ değeri azalmaktadır ve çözüm $f^\delta \rightarrow f$ olmaktadır. Büyük γ değeri için ise değiştirilmiş farklılık ρ , (3.23) denkleminde belirtildiği gibi klasik farklılık ρ' ile örtüşmektedir (Veselovskii et al., 2002).

Veri analizlerinde en önemlisi bağıl hatadır ve farklılık aşağıdaki şekilde normalize edilmektedir:

$$\rho \equiv \frac{1}{N} \sum_i \frac{\|g_i^\delta - A|f^\delta\|}{g_i^\delta} \quad (3.30)$$

γ değeri $[r_{\min}, r_{\max}]$ inversiyon aralığına, δ optik veri hatalarına ve partiküllerin karmaşık kırılma indislerine bağlıdır. Bu yaklaşımdaki çözüm seçimi aşağıdaki adımları içermektedir:

- $r_{\min}$, $r_{\max}$ ve kompleks kırılma indisi $m = m_R - im_I$ $0,05 - 0,5 \mu\text{m}$ arasında değişen $\Delta r_{\min}$, $\Delta r_{\max}$, Δm_R , Δm_I , $R_{\min}$ aralıklarında değişim göstermektedir. $R_{\max}$ $0,1 - 1 \mu\text{m}$ arasında değişim göstermektedir fakat büyük partiküllerin simülasyonu, bu aralığın $10 \mu\text{m}$ 'ye kadar arttırılabileceğini göstermektedir. Hesaplamanın başlangıç aşamasında, $R_{\min}$ ve $R_{\max}$ değerlerindeki değişimin basamak aralığı sırasıyla $0,05$ and $0,1 \mu\text{m}$ 'dir. $R_{\min}$ ve $R_{\max}$ değerlerinin yaklaşık konumları belirlendiğinde, $0,01 - 0,02 \mu\text{m}$ basamak aralığı kullanılarak daha küçük bir aralık içerisinde hesaplamalar tekrarlanmaktadır. Bu nedenle genellikle birçok yüzlerce inversiyon penceresi göz önünde bulundurulmaktadır. Sonuç olarak, daha önce kullanılan sınırlandırılmış 50 pencere grubu (Müller et al., 1999) ile kıyaslandığında, incelenmiş partikül boyutu dağılımı çözümü daha iyi olmaktadır. m_R gerçek kısmı $1,1 - 1,8$ değerleri arasında, m_I sanal kısmı ise $0 - 0,1$ değerleri arasında değişmektedir. Başlangıç tahminlerinin ardından aralık azalmaktadır ve hesaplamalar $0,01$ basamak genişliği ile gerçekleştirilmektedir.

- Belirlenen aralıklar içerisinde bulunan her $r_{\min}$, $r_{\max}$, m_R , m_I değeri ve γ dizisi için, program denklem (29) ve (18)'i kullanarak $\tilde{f}_\gamma^\delta$ çözümünü hesaplamaktadır. γ dizisi $\gamma = 2^K 10^{-b}$ şeklinde belirlenmektedir ve bu formülde yer alan hesaplama sayısı $K = 1, 2 \dots 25$ değerlerini almaktadır. b parametresi hesaplama aralığı içerisindeki fonksiyonun minimizasyonu için 20 ile 28 arasında seçilmektedir. Denklem (3.21)'deki integrasyon aşaması genellikle $0.002 \mu\text{m}$ değeri seçilmektedir.

- Her çözüm için $\rho(\gamma)$ farklılık değeri belirlenmektedir. $\rho(\gamma)$ minimum değerine karşılık gelen $\tilde{f}_\gamma^\delta$ değerinin denklem (3.17)'nin çözümü olduğu kabul edilmektedir.

Değiştirilmiş farklılığın kullanılması, veri hataları önceden tahmin edilmeden Lagrange çarpanının belirlenmesini sağlamaktadır. Lagrange çarpanı çok büyük seçildiğinde çözüm çok aşırı düzeltilmiş olmaktadır ve küçük γ değeri için çözüm salınım göstermektedir. Değiştirilmiş farklılık hesabı için sadece pozitif $|f^\delta|$ değerleri kullanılsa da, f^δ çözümleri negatif salınım değerleri alabilmektedir (Veselovskii et al., 2002).

Lidar sistemi, daha önce bahsedilen partiküllerin kimyasal ve fiziksel özelliklerini bozabilecek şekilde gerçek bir temas olmaksızın aerosol parametrelerinin detaylı şekilde gözlemlenebildiği yegane cihaz olma özelliğine sahiptir. Bu sistemin, aerosol parametrelerini uzaysal olarak, sınırlı bir süre içerisinde ve kesin olarak gözlemleyip belirleyebilecek şekilde geliştirilmesine ihtiyaç bulunmaktadır. Bu nedenle, troposferik aerosollerde ve bu partiküllerin mikrofiziksel özelliklerinde meydana gelen değişimlerin incelenebilmesi amacıyla çoklu dalga boyuna sahip Mie-Raman lidar sistemi tasarlanmış, geliştirilmiş ve kullanılmıştır.

3.3 Lidar Tasarımı, Geliştirilmesi ve Yerleştirilmesi

Aerosollerin uzaysal, zamansal ve mikrofiziksel parametrelerinin araştırılması amacı ile çok dalga boylu Mie-Raman Lidarı, TÜBİTAK Marmara Araştırma Merkezi (MAM) KA09 Lazer Spektroskopi Laboratuvarı'nda dizayn edilmiş, geliştirilmiştir. Söz konusu dizayn, araştırma ve gelişime ile tümleştirme çalışmalarında, TÜBİTAK MAM araştırmacılarından oluşan 9 kişilik proje grubu yer almıştır. Söz konusu dizayn çalışmaları ve bazı mekanik kısımlar Türk araştırmacılar tarafından geliştirilerek gerçekleştirilmiş, ancak çeşitli optik, elektronik ve mekanik kısımlar uluslararası tedarikçilerden sipariş ile temin edilmiştir.

Söz konusu Lidar sistemi, TÜBİTAK MAM'ın Marmara Denizi kıyısında (İzmit Körfezi), İstanbul Boğazı'nın yaklaşık 40 km doğusunda yer alan Gebze bölgesinde bulunmasından ve sanayileşmenin yoğun olmasına bağlı olarak hava kirliliğin yoğun olması nedeniyle hedef ölçümleme noktası Gebze bölgesinin olması

göz önüne alınarak, Gebze bölgesinde konumlandırılmıştır. Tez konusu çalışmada, Gebze bölgesi sanayilerinin yoğun olarak yer aldığı ve oluşan hava kirliliklerine bağlı kanserden ölüm oranının Türkiye ortalamasının üç katı olduğu Dilovası beldesi hava sahası, Lidar tekniğiyle hedef aerosol ölçümleme bölgesi olarak tercih edilmiştir.

TÜBİTAK MAM KA09 Lazer Spektroskopi Laboratuvarı'nda yer alan lidar sistemine ait teleskop ünitesi, hedeflenen amaca uygun olarak dizayn edilmiş ve yapımı TÜBİTAK MAM'da gerçekleştirilmiştir. Teleskop içerisinde yer alan ana ayna ve eliptik aynalar ile kolimatör aynaları ve verici aynaları Rus firmalardan siparişle temin edilmiştir. Lidar sistemini taşıyan, açı ayarlama özelliğine sahip ayaklar Rusya'da dizayn ve imal edilmiştir. Verici ünitesi (lazer ışık kaynağı), Fransız Quantel firmasından alınmıştır. Spektrum analiz ünitesi, TÜBİTAK MAM'da dizayn edilmiş ve geliştirilmiş olup, söz konusu üniteye kullanılan aynalar Rus firmalarından temin edilmiştir. Lidar Sistemi, ölçümlemede alınan optik verinin, elektronik sinyallere çevrildiği 7 kanala sahiptir. Söz konusu amaç için kullanılan Fotoçoğaltıcıların (PMT) yer aldığı ve yerleştirildiği bu kısmın levhası TÜBİTAK MAM'da dizayn edilerek, imal edilmiştir. 5 fotoçoğaltıcının içerisinde yer alan dikroik aynalar ise Rusya'dan ve analog-dijital çeviricileri Japon Hamamatsu firmasından temin edilmiştir. Geri kalan 2 kanal için foto sensör modülü, Hamamatsu H7422, Japon Hamamatsu firmasından ve yakın kızıl ötesi çoğaltıcı fotodiyot Almanya, Licel firmasından alınmıştır. Fotoçoğaltıcılar için yüksek voltaj kaynakları, Amerikan, Stanford Electronics Inc.'den temin edilmiştir. Lidar sistemi veri kabloları, RG-174 sinyal kabloları Türkiye'den sağlanmıştır. Veri işlem ünitesi yine Alman firması Licel'den temin edilmiştir. Lidar sisteminin elektronik aksamalarının ve lazer ışının kalibrasyonun yapılması amacı ile Amerikan firması olan Tektronix firmasından TDS2002 osiloskop temin edilmiştir. Lidar sistemi çalışmaktayken, göküzüne gönderilen lazer ışınının insan gözü için tehlikeli olması göz önüne alınarak, uçak ve helikopter gibi hava taşıma araçlarında yer alan operatörlere zarar vermemek amacı ile Türkiye Temsilciliği bulunan Furuno firmasından 1715 modeli radar sistemi de temin edilmiştir. Sistem veri işleme ve yorumlamasının yapılması

için gerekli yazılım Türk ve Rus araştırmacılarının birlikte yapmış olduğu çalışmalar ile geliştirilmiştir.

Yukarıda belirtilen Lidar sistemlerinin tüm bileşenlerinin temin edilmesi ile birlikte Türk ve Rus araştırmacılar tarafından oluşan grup ile söz konusu sistemin tümleştirme çalışmalarına başlanmıştır. İlk olarak, teleskopa ait optik parçaların (aynalar) montajları gerçekleştirilerek, teleskop açısı ayarlanabilir ayaklara monte edilmiştir. Kolimatörün de teleskopa montajının gerçekleştirilmesinin ardından üzerinde bulunan optik kısımların kalibrasyonu gerçekleştirilmiştir. Fotoçoğaltıcılar ile fotoçoğaltıcılar arasındaki veri kabloları birbirleriyle bağlantıları gerçekleştirilmiş, tüm elektronik aksamlar, elektronik dolaba yerleştirilmiştir. Sistemin tümleştirme çalışmalarının ardından tüm kalibrasyon ayarları tekrardan yapılmış ve kontrol edilmiş olup test çalışmalarına başlanmıştır. Sistem ilk test çalışması, TÜBİTAK MAM KA09 Lazer Spektroskopi Laboratuvarı'ndan, Gebze bölgesi hava sahasına, 13 Mayıs 2009 tarihi, saat 20:55' de lazer ışığının gönderilmesiyle başlanmıştır. Sistem etkinliğinin tespiti ile Gebze ve İstanbul bölgesine ait hava sahasının aerosol çalışmalarına başlanmıştır. 2011 yılı içerisinde yeni Lidar laboratuvarının tamamlanması ile sistem, bir önce bulunduğu irtifadan 9 metre daha yukarıya taşınarak, TÜBİTAK MAM' ın en yüksek laboratuvarı olma özelliğine sahip olmuştur. Bu özellik, lidar sisteminin bulunduğu yerden 360°'de tüm hava sahasında ölçümleme yapabilme kabiliyetini artırmış ve ileride yapılması planlanan ve tasarımı gerçekleştirilen tarama modülünün lidar sistemine entegre edilebilme kabiliyetine imkan sağlamıştır. Sisteme ait fotoğraf Şekil 3.1 ve sistemin çalışma esnasındaki fotoğrafı Şekil 3.2'de gösterilmiştir.



Şekil 3.1., Lidar Sistemi.



Şekil 3.2., Lidar sistemi çalışırken.

3.3.1 Lidar Teknik Özellikleri

- **Işık kaynağı:** Nd:YAG Lazeri, QUANTEL, BRILLIANT B Q-switched
- **Işık kaynağı tekrar hızı:** 10 Hz
- **Işın çapı:** 6 mm kolimasyon öncesi; 40 mm kolimasyon sonrası
- **Yayılan dalga boyları (Enerji):** 355 nm (200 mJ); 532 nm (250 mJ); 1064 nm (400 mJ)
- **Dalga boyunda tespit edilen enerji:** elastik- 355 nm, 532 nm, 1064 nm; inelastik- 387 nm, 607 nm (N₂), 408 nm (H₂O); depolarizasyon 355 nm
- **Dedektör tipi:** 6 kanal için PMT; 1064 nm kanalı için APD
- **Işın ıraksaması:** 0.15 mrad
- **Teleskop görüş sahası:** asgari 0.25 mrad; azami 1 mrad
- **Ana parabolik ayna apertürü:** 400 mm
- **Teleskop modülünün tam boyutları:** 1200 mm (Boy); 500 mm (En); 500 mm (Yükseklik)
- **Teleskop modülünün ağırlığı:** yaklaşık 60 kg
- **Ölçümleme açısı:** Ölçümler ufukla 0° - 90° arasında yapılabilmektedir
- **Tespit elektroniği:** LICEL, analog + photon sayma

3.3.2 Ölçümleme Metodu

TÜBİTAK MAM'da geliştirilen ve konumlandırılan lidar sistemi ile ölçümler yataydan 30° açı ile gerçekleştirilmektedir. Lazer ışınının, daha yüksek çözünürlük verileri ve troposfer içerisinde daha uzun süre kalması amacı ile lidar sistemi yatay eksen 30° açı ile eğimlidir. Aerosol katmanlarının gerçek yüksekliğinin hesaplanması amacıyla aşağıdaki formül kullanılmaktadır:

$$H = d \sin\theta + H_i \quad (3.34)$$

Bu formülde yer alan d lidar ile aerosol arasındaki mesafe, sistem yatay eksen açısı, H_i ise yaklaşık 223 m olan lidar mevki yüksekliğidir.

Lidar sistemi ile Mayıs 2009 tarihinden başlayarak Mayıs 2012 tarihine kadar pek çok ölçümlemeler gerçekleştirilmiş ve halihazırda sistem bileşenleri ve yazılımı geliştirilerek gerçekleştirilmektedir. Ölçümler 24'er saatlik süreler ile devam ettirilerek gerçekleştirilmekte ve bu sayede daha iyi ortalama verilerin elde edilmesi sağlanmıştır. Ölçümler 12 ay boyunca haftada iki kez olacak şekilde gerçekleştirilmiştir fakat bazı olumsuzluklar meydana gelmiştir. Özellikle kış ayında meteorolojik koşullar, ölçümlerin planlandığı şekilde yapılmasını engellemiştir. Aerosol lidar prensibi aerosollerden gerisaçılım ve ışın azalımı olaylarına bağlıdır. Bu duruma izin vermeyen durumlar ortaya çıktığında veri elde edilememektedir. Bu nedenle yağmurlu, sisli, dumanlı ve alçak bulutların olduğu günlerde elde edilen veriler gürültülü (noisy) olduğu için, böyle günlerde ölçüm yapılamamaktadır. Buna ek olarak lazer uygulamalarında yangın tehlikesi bulunması ve güvenliğin en önemli konu olması nedeniyle, lidar sistemi ile ölçüm gerçekleştirilirken operatörün sistemin yakınında bulunması gerekmektedir.

Sistem ile çalışma esnasında üstesinden gelinmesi ve idealize edilmesi gereken en önemli konu gürültüdür. Genellikle bu tür çoklu dalgaboyuna sahip lidar sistemlerinde elektriksel ve atmosferik olmak üzere iki çeşit gürültü bulunmaktadır. Elektriksel gürültünün pek çok sebebi bulunmaktadır. Lidar mekanik, elektronik ve optoelektronik olmak üzere pek çok parçadan meydana gelmektedir ve bunların çoğunun çalışabilmesi için kendi güç kaynakları bulunmaktadır. Buna ek olarak, sinyal eşeksenli sinyal kablolarına ve fiber optik kablolarına taşınmaktadır. Elektronik gürültüyü elimine etmek amacıyla 24 saat süren ölçüm öncesinde ve sonrasında teleskopun spektrum analizörü bir kapak ile kapatılarak sistem 1 dakika süre ile çalıştırılmaktadır. Bu nedenle, 1 dakika sonucunda elde edilen veri atmosferden herhangi bir veri içermeyip sadece gürültüden meydana gelmektedir. Ölçümden önce ve sonra elde edilen bir dakikalık verinin ortalaması alınarak, elektriksel gürültünün olmadığı verinin elde edilmesi amacıyla tüm veriden çıkarılmaktadır. Diğer tür gürültüler ise gökyüzü arka planından, çeşitli yansımalarından, saçılımlardan ve cihaz

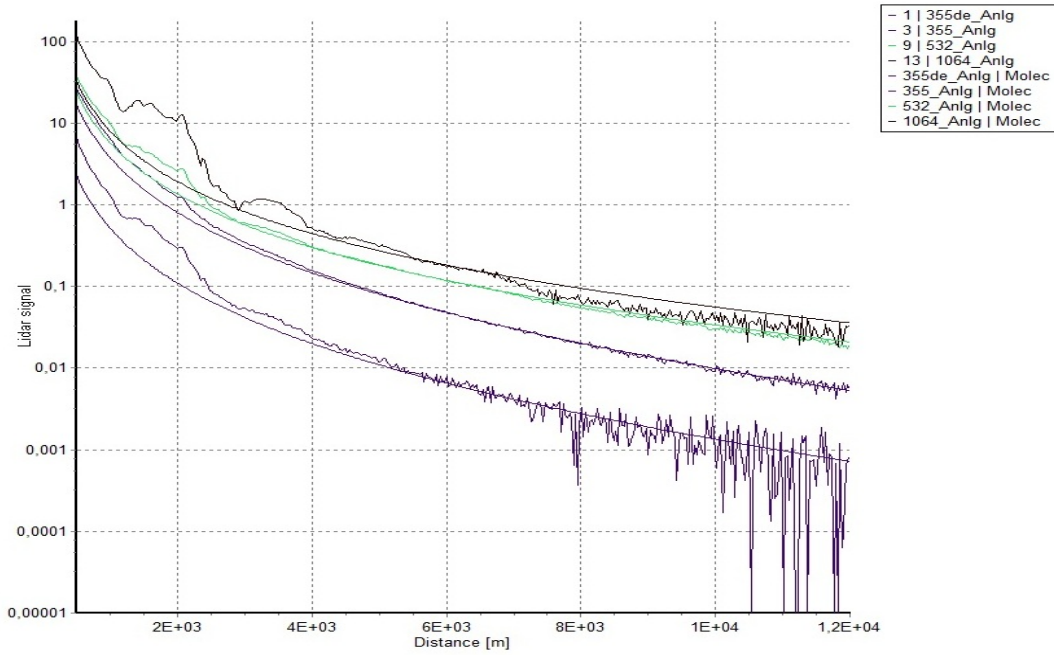
arızalarından kaynaklanmaktadır. Atmosferik gürültünün elimine edilmesi için, 50-60 km arasındaki yükseklikten gelen sinyaller veri grubu olarak seçilmektedir. Atmosferin bu bölgesinde aerosol bulunmamaktadır fakat halen zayıf bir arka plan (background) sinyali bulunmaktadır. Bu yükseklikler arasındaki sinyalin şiddeti seçilmektedir, ortalaması alınmaktadır ve atmosferik gürültünün olmadığı verinin elde edilmesi için tüm veri grubundan çıkarılmaktadır. Bu nedenle, geliştirilmiş lidar sistemi partikül mikrofiziksel parametrelerinin elde edilmesi için aerosol gerisaçılım ve ışın azlımı katsayılarının hesaplanabilmesini sağlamaktadır.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1 Bulgular: Ham Sinyal Verilerinden Bilgiye Ulaşma

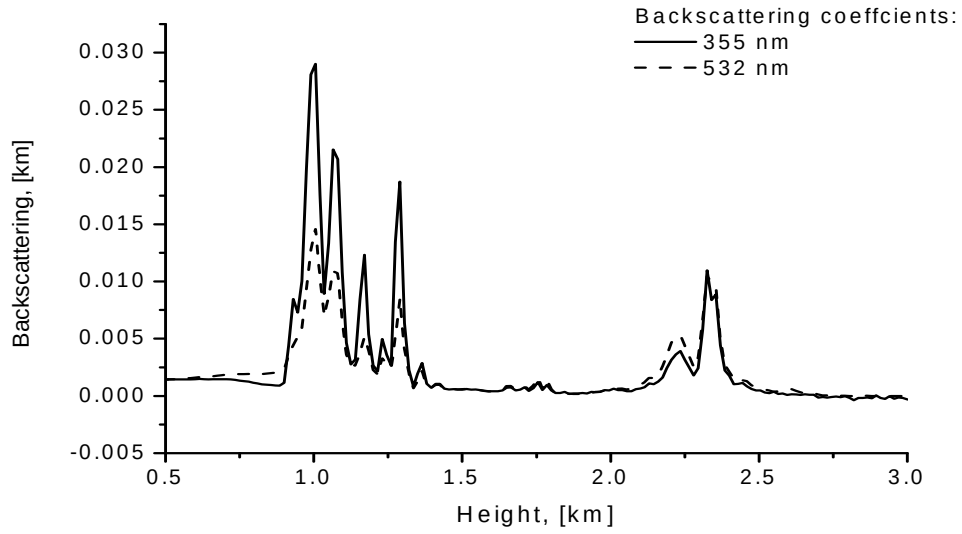
Bu tez süresince Gebze ve Dilovası Bölgesi'nde doğal ve endüstriyel kaynaklı aerosollerin uzay ve zamansal dağılımı ve mikrofiziksel özellikleri lidar ile ölçülmüş ve bulgular incelenmiştir. Bu bölümde 2011 ve 2012 yılı içerisinde lidar ölçümlemeleri için uygun açık gökyüzü koşullarındaki üçer günden elde edilen detaylı bulgular sunulmuştur.

Lazer verici tarafından atmosfere gönderildikten sonra geri saçılarak gelen lazer ışığı teleskop tarafından toplanmakta ve spektrum analizatöründe (spectrum analyzer) ayrıştırılarak fotoçoğaltıcı tüplerde (photomultiplying tube) ışık enerjisinden elektronik sinyale dönüştürülmektedir. Bu sinyal, Licel marka TR40-160 model veri işleme ünitesinde kaydedilerek bilgisayara gönderilmektedir. Bilgisayara ham veri olarak gelen bu sinyal özel olarak bu lidar kurulumu için tasarlanmış bilgisayar programı ile işlenmektedir. Öncelikle iki tür gürültü söz konusudur: aygıtsal gürültü ve atmosfer gürültüsü. Bu gürültülerin toplam veriden çıkartılması ve verinin temizlenmesi gerekmektedir. Bu nedenle her ölçümden önce ve sonra birer dakika lidar aygıtında spektrum analizatörü kapatılmış ve dolayısıyla o dakikalar içerisinde kayıt edilmiş olan veri atmosferden değil sadece aygıttaki çeşitli elektronik parçaların iç gürültülerden oluşmaktadır. Bu ilk ve son 1 dakikalık ölçümlerdeki verilerin ortalaması alınıp toplam ölçüm verilerinden çıkartılarak veri, aygıt gürültüsünden arındırılır. Buna ek olarak atmosferin 25-30 km uzaklıktaki kısmından gelmekte olan sinyal yine toplam veriden çıkartılarak lidar verileri atmosfer gürültüsünden de arındırılır, çünkü bu yüksekliklerde aerosollerin bulunmadığı bilinmektedir. Aşağıda bir örnek teşkil etmesi açısından lidar sinyalinden anlamlı mikrofiziksel özelliklere ulaşılması bir dizi şekilde (Şekil 4.1 – 4.4) gösterilmiştir.



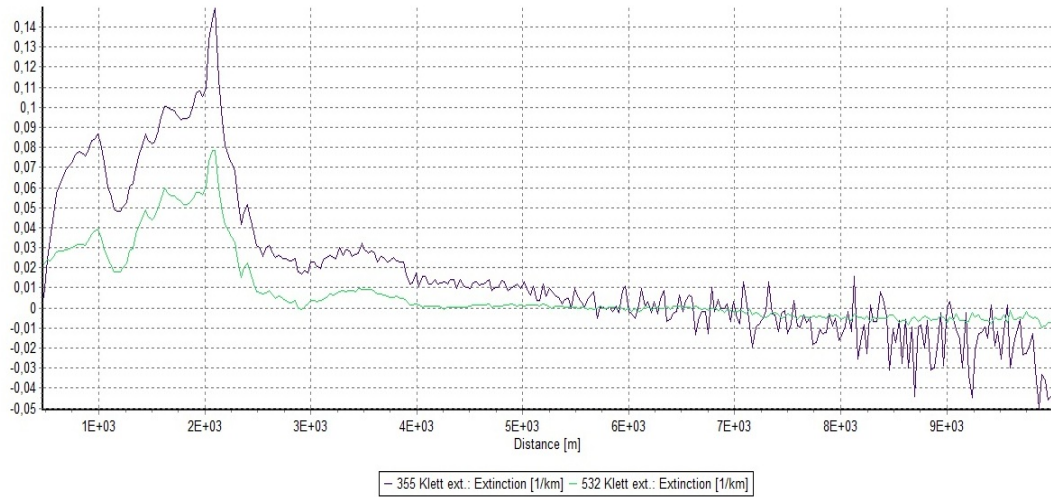
Şekil 4.1., Üç dalga boyundaki lidar sinyalleri

Şekil 4.1’de üç dalgaboyunda (355 [dik ve paralel polarizasyon şeklinde], 532 ve 1064 nm) ortalama lidar sinyalleri görülmektedir. Bu sinyaller 20 Temmuz 2011 gününde, 21:00 ile 23:00 arasında yapılan 2 saatlik ölçümdeki verilerin 20 dakikalık bir kısmının ortalaması alınarak bulunmuştur. x eksenı sinyalin lidar aygıtına olan uzaklığını, y eksenı de lidar sinyalini göstermektedir. Mor çizgiler 355 nm kanallarını, yeşil çizgiler 532 nm kanalını ve siyah çizgiler 1064 nm yakın kızılötesi kanalını temsil etmektedir. Düz çizgiler idealize edilmiş olarak azot gazından oluşan atmosferdeki moleküler geri saçılımı ve salınımlı çizgiler de lidara ulaşan toplam geri saçılımı yani lidar sinyalini temsil etmektedir.



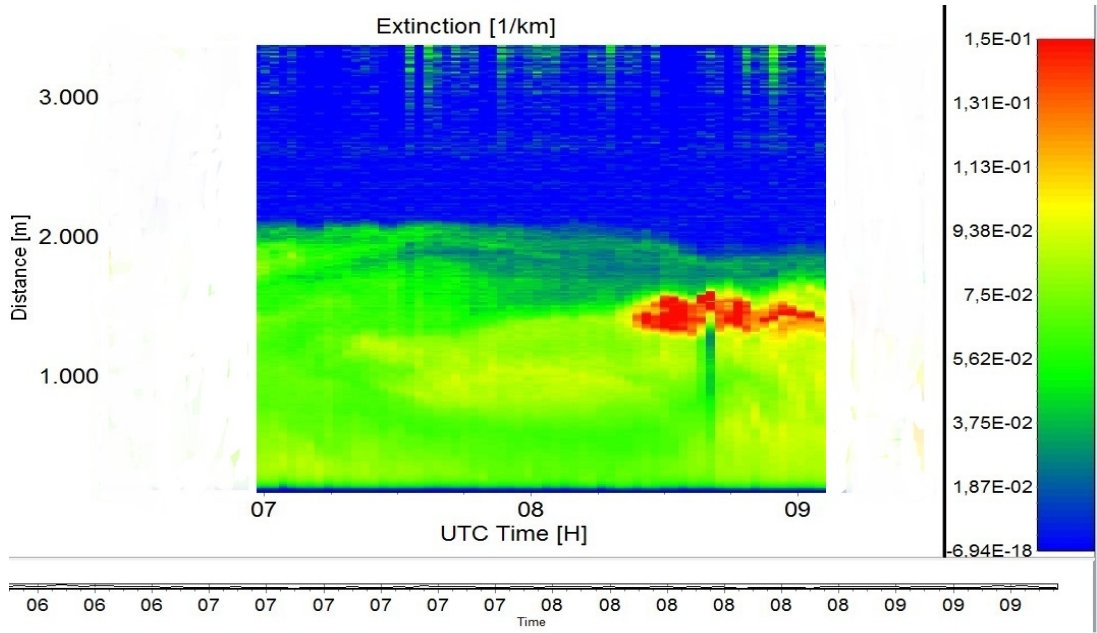
Şekil 4.2., 2 dalga boyunda geri saçılım katsayısı hesaplaması

Şekil 4.2’de aynı ölçümden elde edilen lidar sinyali verileri ile 2 dalgaboyunda gerisaçılım (backscattering) katsayısı hesaplanmıştır. Burada, düz çizgi 355 nm’de ve kesikli çizgi 532 nm’de yükseklikle gerisaçılımın değişimi görülmektedir. Bu şekilde x eksenini geri saçılım katsayısını ve y eksenini yüksekliğini göstermektedir.



Şekil 4.3., 355 ve 532 nm dalgaboylarında ışın azalımı katsayıları hesaplaması

Burada 355 nm ve 532 nm dalgaboylarında ışın azalımı (extinction) katsayıları gösterilmiştir. Buradaki hesaplama "Materyal ve Metod" bölümünde bahsedilen Klett yöntemi ile gerçekleştirilmiştir. Mor çizgi 355 nm ve yeşil çizgi 532 nm dalgaboylarındaki ışın azalımını göstermektedir.



Şekil 4.4., 2 saatlik ölçüm süresince ışın azalımının uzay zamansal değişimi

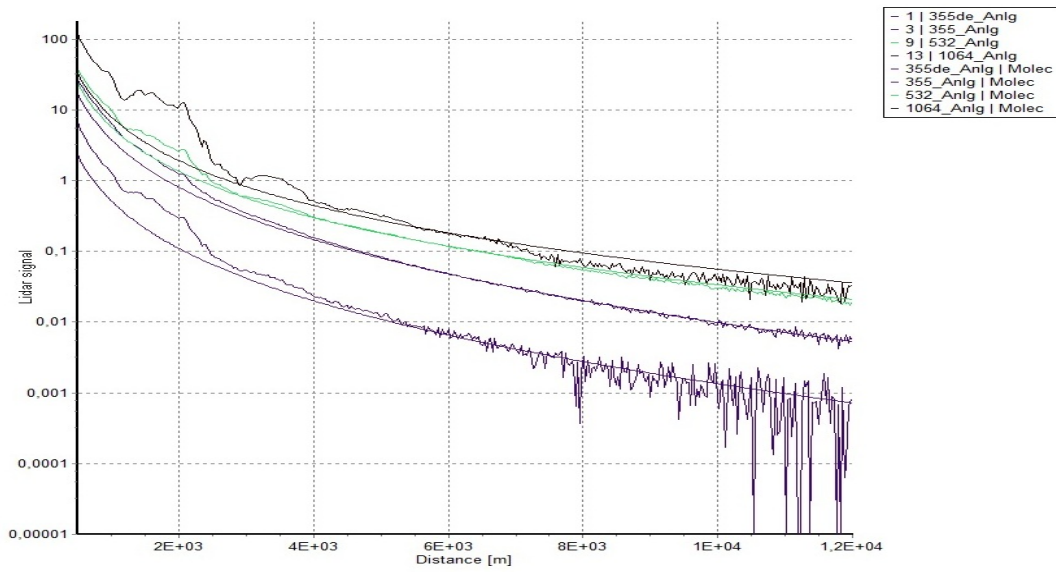
Şekilde 2 saatlik ölçüm süresince ışın azalımının uzay zamansal değişimi gösterilmektedir. Üç boyutlu renk haritaları (color maps) bu tür ölçümlerde, uzay (distance, x eksen), zaman (time, y eksen) ve yoğunluk (renkle kodlanmış yoğunluklar) gibi üç ayrı değişkenin resmedilmesinde çok faydalıdır. En sağ tarafta vermiş olan renk cetveli hangi rengin hangi yoğunluğa karşılık geldiğini göstermektedir.

4.2 Dilovası Bölgesi Aerosollerinin Uzaysal ve Zamansal Dağılımının İncelenmesi

Daha önce de bahsedildiği gibi 2011 ve 2012 süresince yapılan lidar ölçümlerinde Dilovası ve Gebze bölge civarında hava koşullarının elverdiği temiz

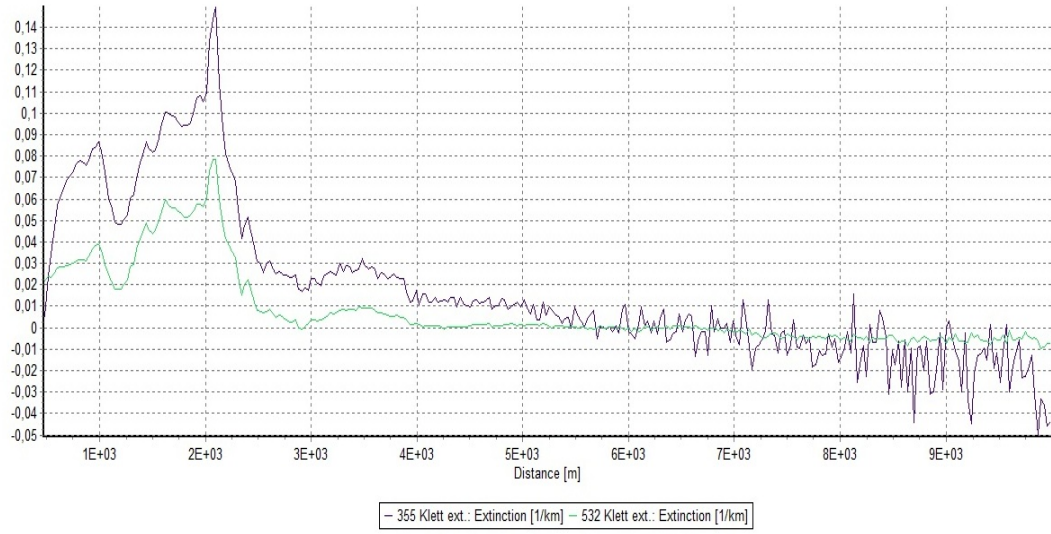
günlerde yapılan 6 adet ölçüm gününün verileri bu bölümde yer alacaktır. Bulgularda, bir önceki bölümde izlenen yöntem tekrar edilecek ve ham veriden önce ortalama lidar sinyalleri ve sonrasında da gerisaçılım, ışın azalımı, polarizasyon gibi özellikler irdelenecek ve renk haritalarıyla zamansal dağılım da belirtilecektir.

4.2.1 20.07.2011 Tarihinde Lidar Sistemiyle Yapılan Ölçümleme



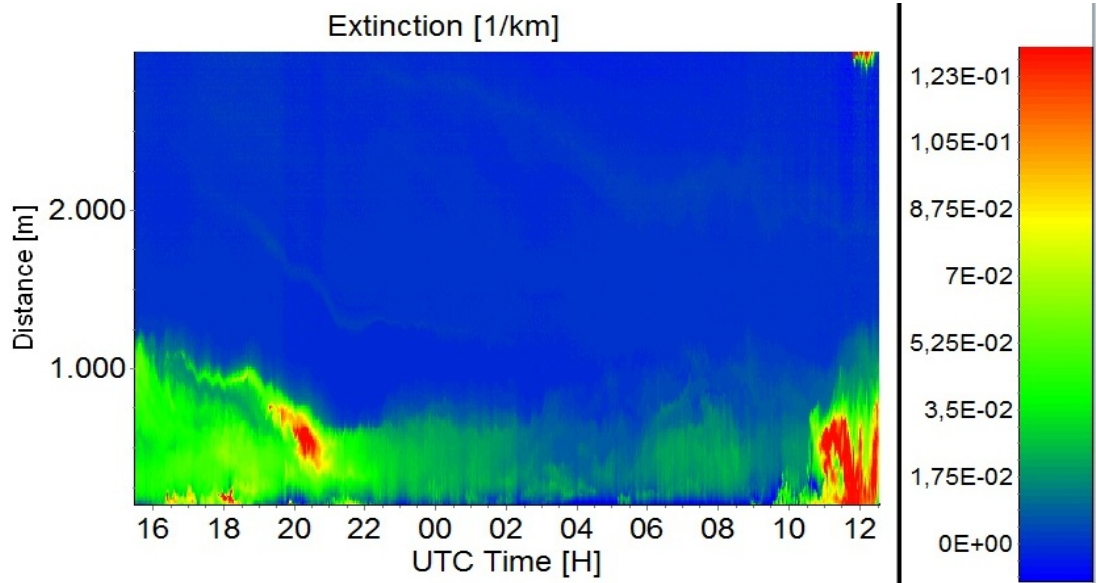
Şekil 4.5., 20.07.2011, Ortalama lidar sinyali.

Şekil 4.5'te görüldüğü gibi moleküllerden ve aerosollerden farklı dalga boylarındaki geri saçılım yaklaşık 4000 m mesafeden sonra aynı düzlemdeydir. Söz konusu durum neticesinde aerosollerin yaklaşık 4000 m mesafeden sonra olmadığı ve yalnızca moleküllerden geri saçılımın olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 4.6., 20.07.2011, 355 ve 532 nm'de ışın azalımı.

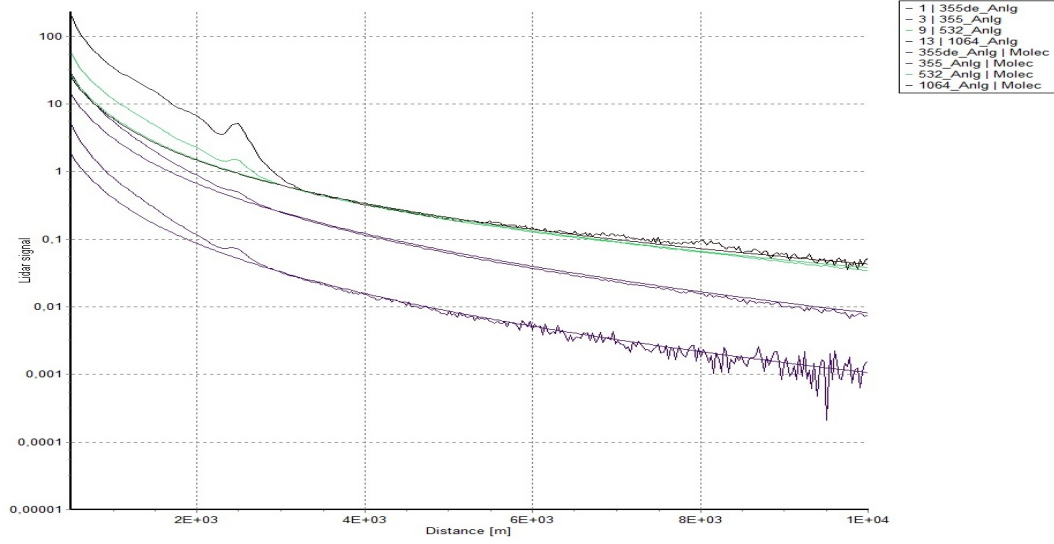
20.07.2011, 355 ve 532 nm'de ışınazalımı, lidar oranı 50 alınarak, Klett yöntemiyle hesaplanmıştır.



Şekil 4.7., 20.07.2011, 532 nm'de ışın azalımı renk haritası

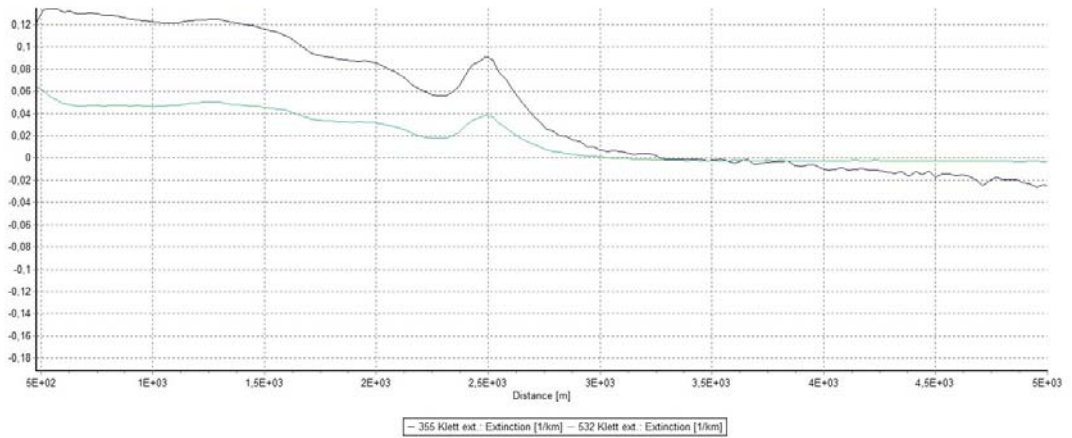
20.07.2011 tarihinde yapılan ölçümleme, 532 nm'de ışın azalımı renk haritası, lidar oranı 50 alınarak, Klett yöntemiyle hesaplanmıştır.

4.2.2 17.08.2011 Tarihinde Lidar Sistemiyle Yapılan Ölçümleme



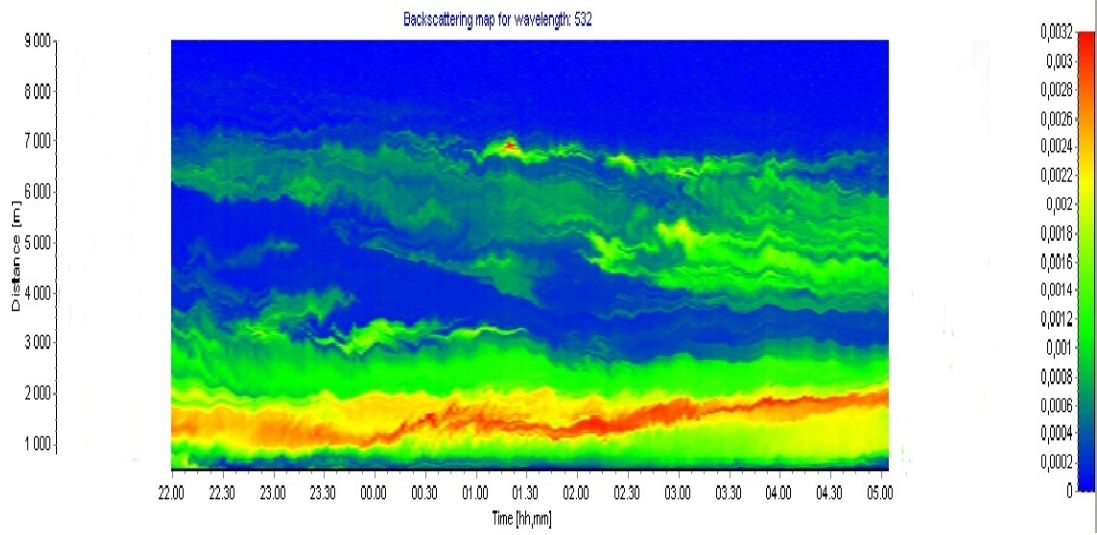
Şekil 4.8., 17.08.2011, Ortalama lidar sinyali.

Şekil 4.8'de görüldüğü gibi aerosollerin yaklaşık 3000 m mesafeden sonra olmadığı ve yalnızca moleküllerden geri saçılımın olduğu gözlemlenmiştir



Şekil 4.9., 17.08.2011, 355 ve 532 nm'de ışın azalımı

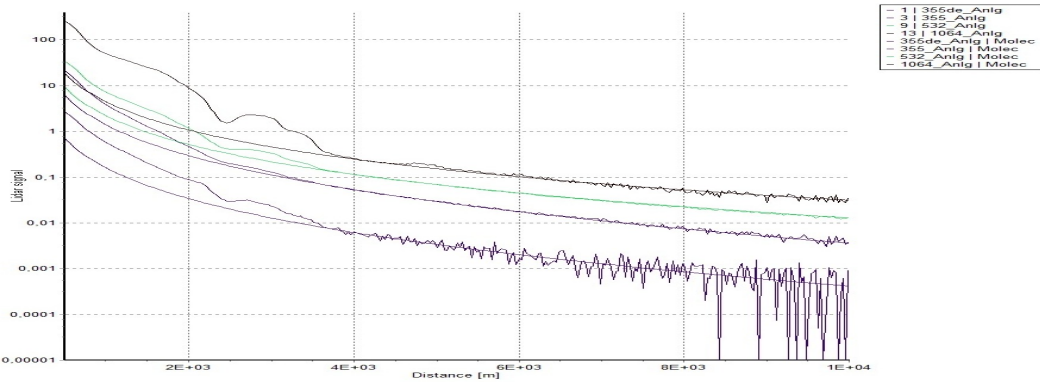
17.08.2011 tarihinde yapılan ölçümlemede, 355 nm ve 532 nm'de ışın azalımı, lidar oranı 50 alınarak Klett yöntemiyle hesaplanmıştır.



Şekil 4.10., 17.08.2011, 532 nm'de gerisaçılımın 10 saatlik değişiminin renk haritası.

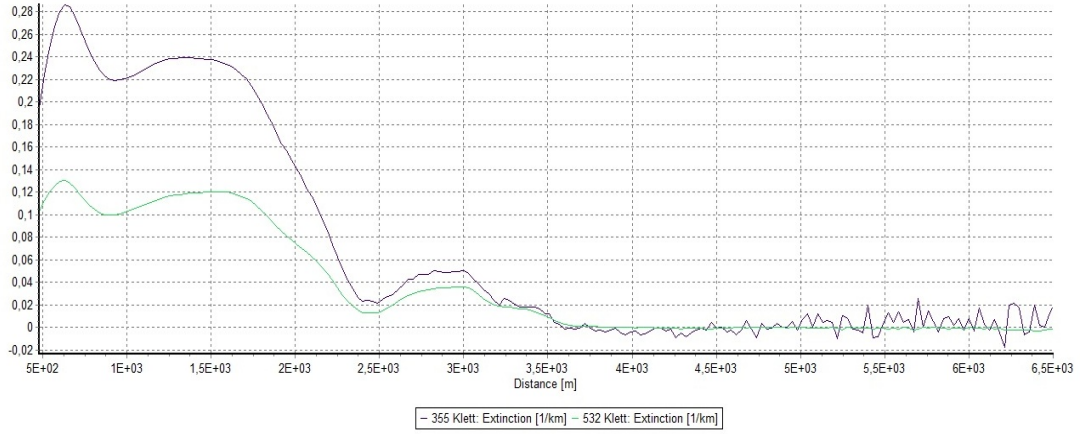
Burada birbirinden ayrı iki katman aerosol görülmektedir. Söz konusu renk haritası sonuçlar ve değerlendirme bölümünde açıklanmıştır.

4.2.3 13.09.2011 Tarihinde Lidar Sistemiyle Yapılan Ölçümleme



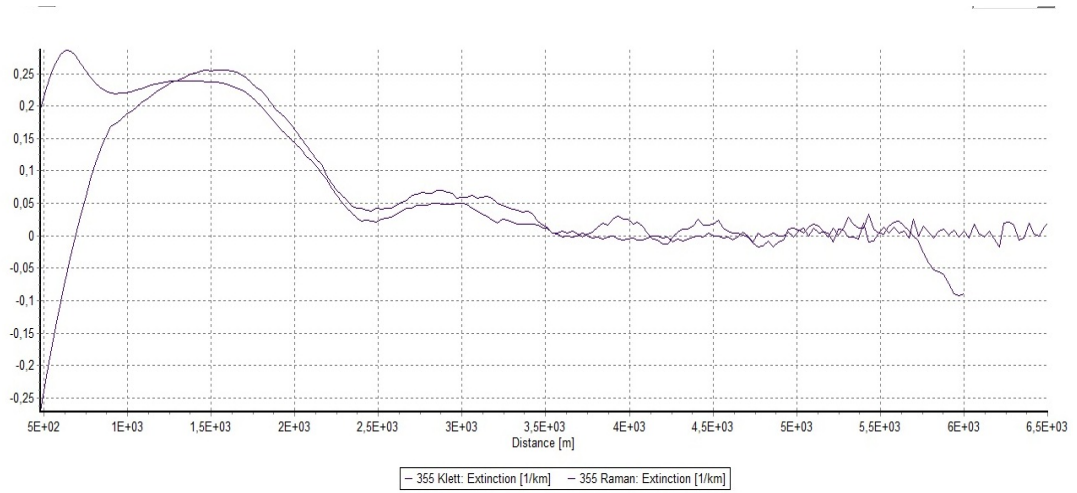
Şekil 4.11., 13.09.2011, Ortalama lidar sinyali.

Şekil 4.11'de görüldüğü üzere aerosollerin yaklaşık 3800 m mesafeden sonra olmadığı ve yalnızca moleküllerden geri saçılımın olduğu gözlemlenmiştir.



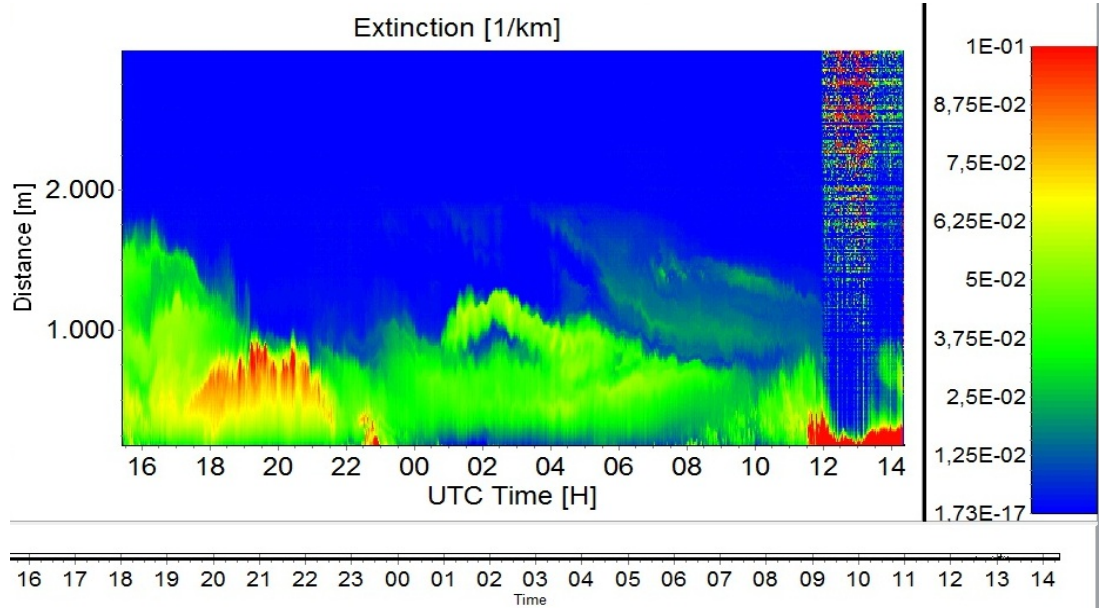
Şekil 4.12., 13.09.2011, 355 ve 532 nm'de ışınazalımı.

13.09.2011, 355 nm ve 532 nm'de ışın azalımı, lidar oranı 50 alınarak Klett yöntemiyle hesaplanmıştır.



Şekil 4.13., 13.09.2011, 355 nm'de ışınazalımı.

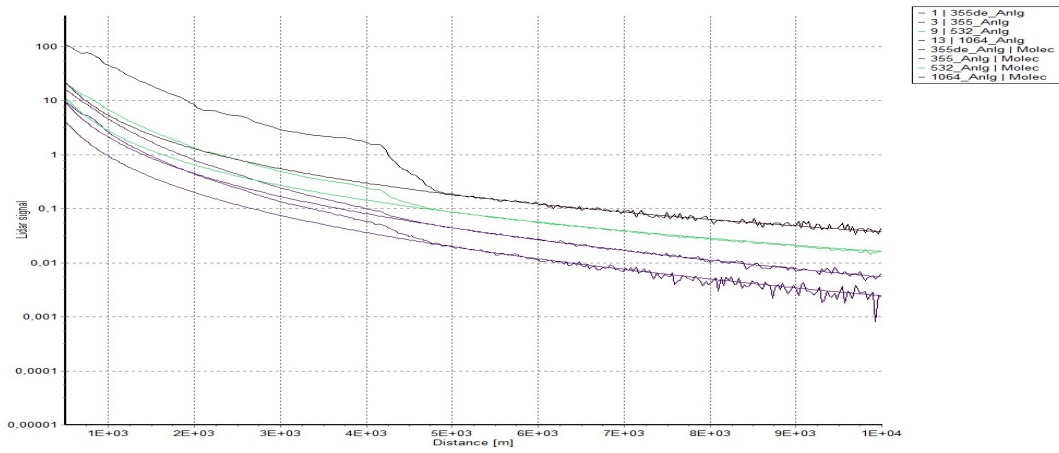
13.09.2011, 355 nm'de ışın azalımı, Angstrom oranı 1 alınarak Klett ve Raman yöntemiyle hesaplanmıştır.



Şekil 4.14., 13.09.2011-14.09.2011, 355 nm' de ışın azalımının 22 saatlik değişiminin renk haritası.

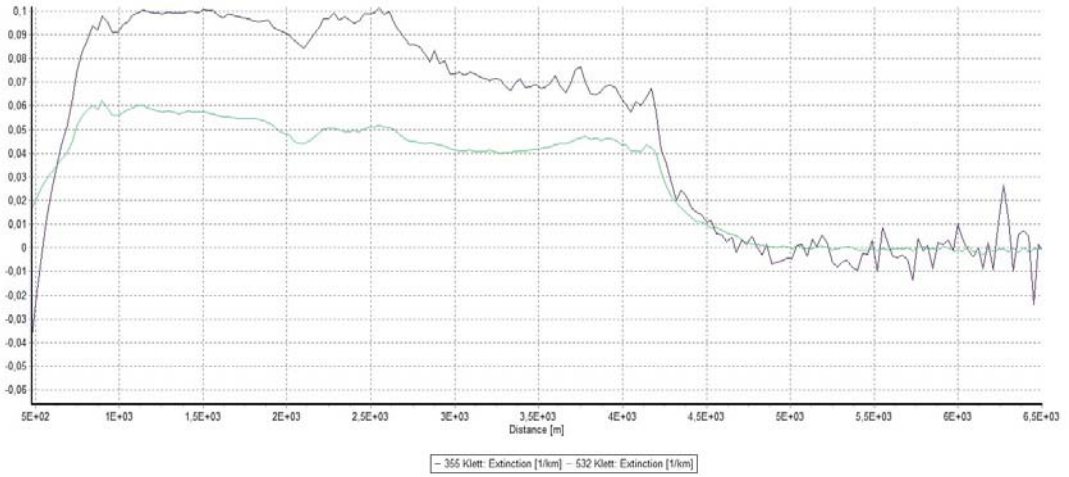
Burada 17:00 ile 22:00 saatleri arasında yoğun bir aerosol katmanının olduğu görülmektedir.

4.2.4 14.03.2012 Tarihinde Lidar Sistemiyle Yapılan Ölçümleme



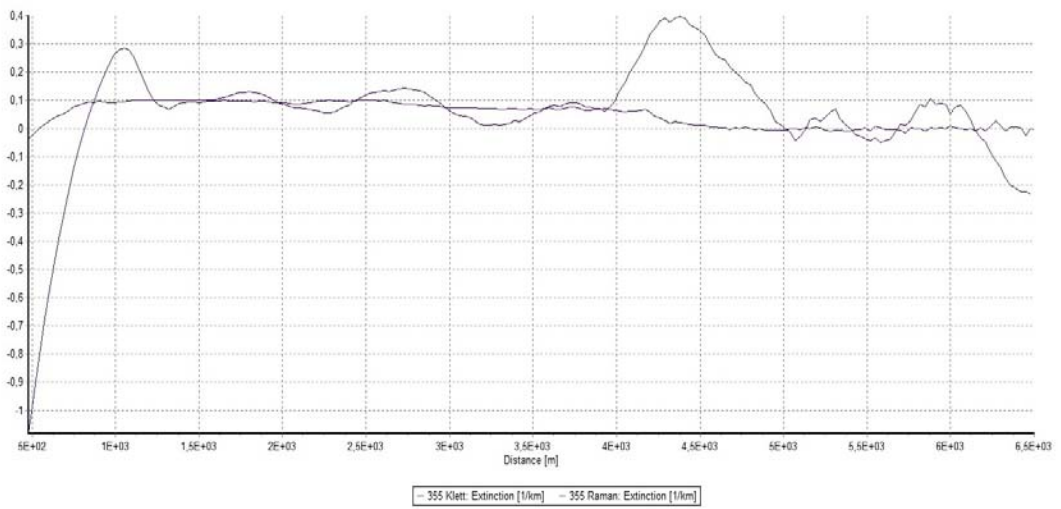
Şekil 4.15., 14.03.2012, Ortalama lidar sinyali.

Şekilden görüldüğü üzere molekülerden ve aerosollerden farklı dalga boylarındaki geri saçılım yaklaşık 4800 m mesafeden sonra aynı düzlemedir. Söz konusu durum neticesinde aerosollerin yaklaşık 4800 m mesafeden sonra olmadığı ve yalnızca moleküllerden geri saçılımın olduğu gözlemlenmiştir.



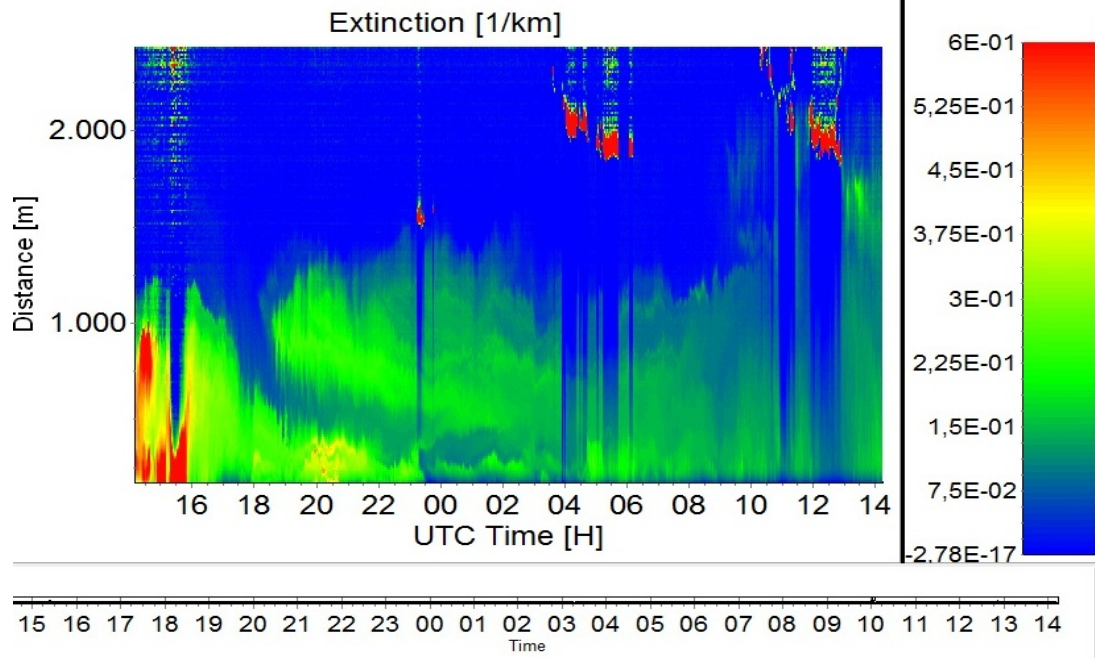
Şekil 4.16., 14.03.2012, 355 ve 532 nm'de ışın azalımı.

14.03.2012, 355 nm ve 532 nm'de ışın azalımı, lidar oranı 50 alınarak Klett yöntemiyle hesaplanmıştır.



Şekil 4.17., 14.03.2012, 355 nm'de ışın azalımı.

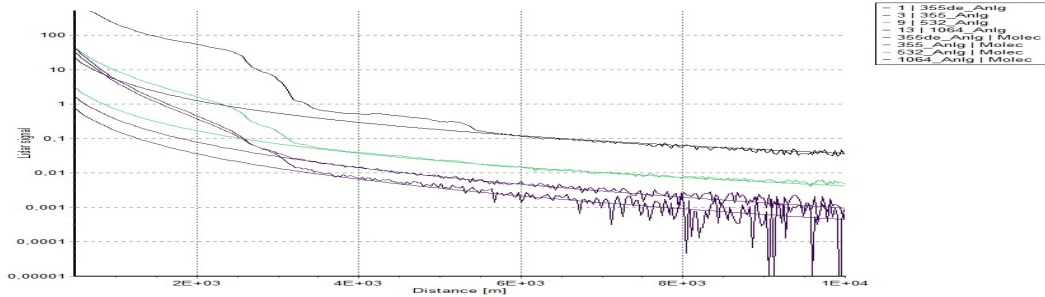
14.03.2012, 355 nm'de ışın azalımı, Angstrom oranı 1 alınarak Klett ve Raman yöntemiyle hesaplanmıştır.



Şekil 4.18., 14.03.2012, 355 nm’de ışın azalımının renk haritası.

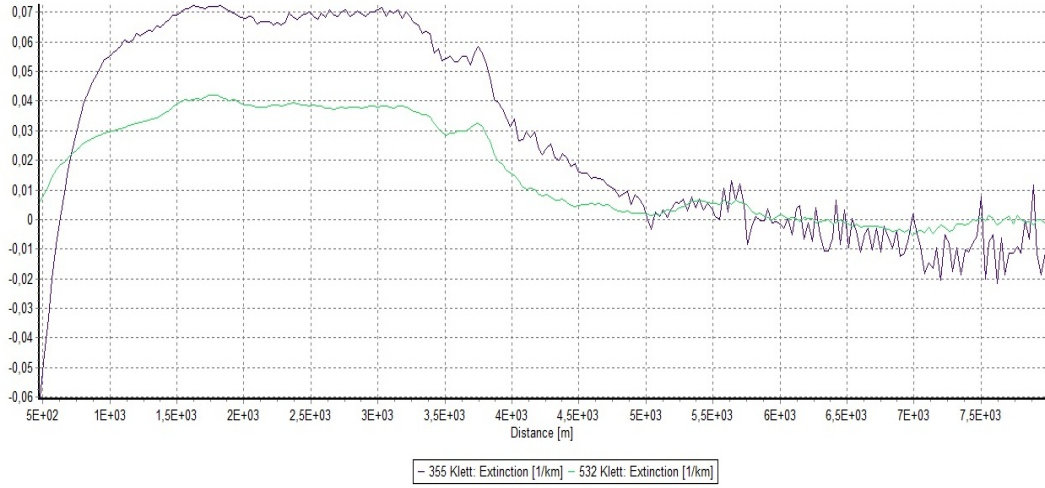
14.03.2012, 355 nm’ de ışın azalımının, lidar oranı 50 alınarak Klett yöntemiyle hesaplanan renk haritası.

4.2.5 07.04.2012 Tarihinde Lidar Sistemiyle Yapılan Ölçümleme



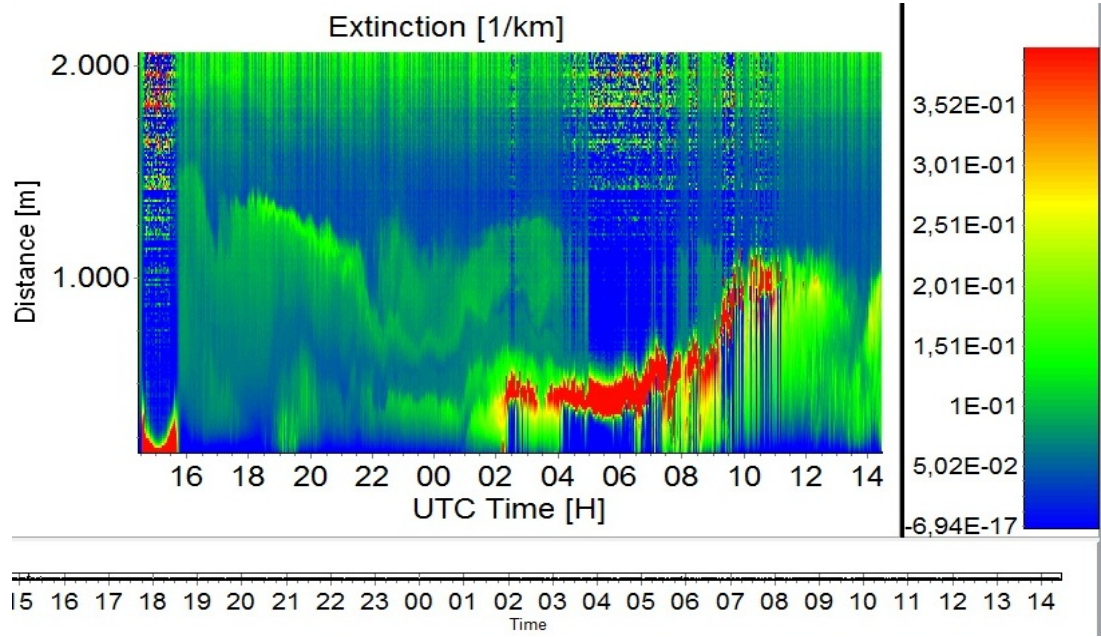
Şekil 4.19., 07.04.2012, Ortalama lidar sinyali.

Şekil 4.19'da görüldüğü üzere molekülerden ve aerosollerden farklı dalga boylarındaki geri saçılım yaklaşık 3200 m mesafeden sonra aynı düzlemededir. Söz konusu durum neticesinde aerosollerin yaklaşık 3200 m mesafeden sonra olmadığı ve yalnızca moleküllerden geri saçılımın olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 4.20., 07.04.2012, 355 ve 532 nm' de ışın azalımı.

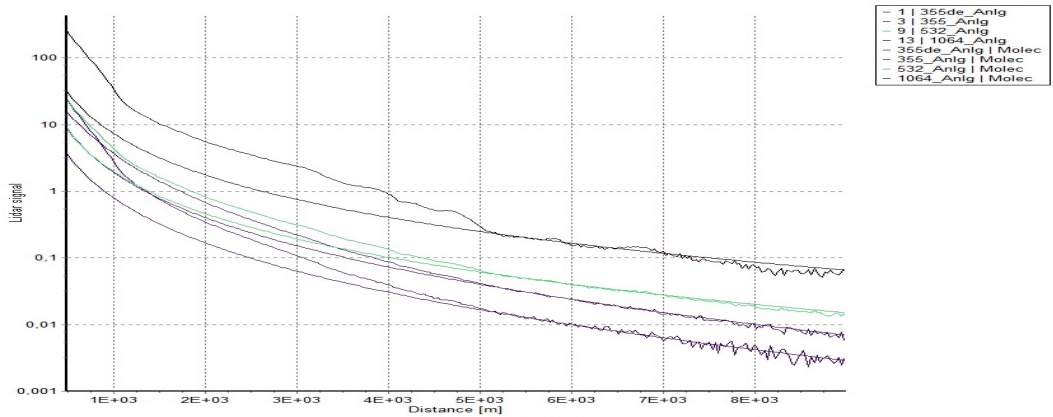
07.04.2012, 355 nm ve 532 nm' de ışın azalımı, lidar oranı 50 alınarak Klett yöntemiyle hesaplanmıştır.



Şekil 4.21., 07.04.2012, 355 nm’de ışın azalımının renk haritası.

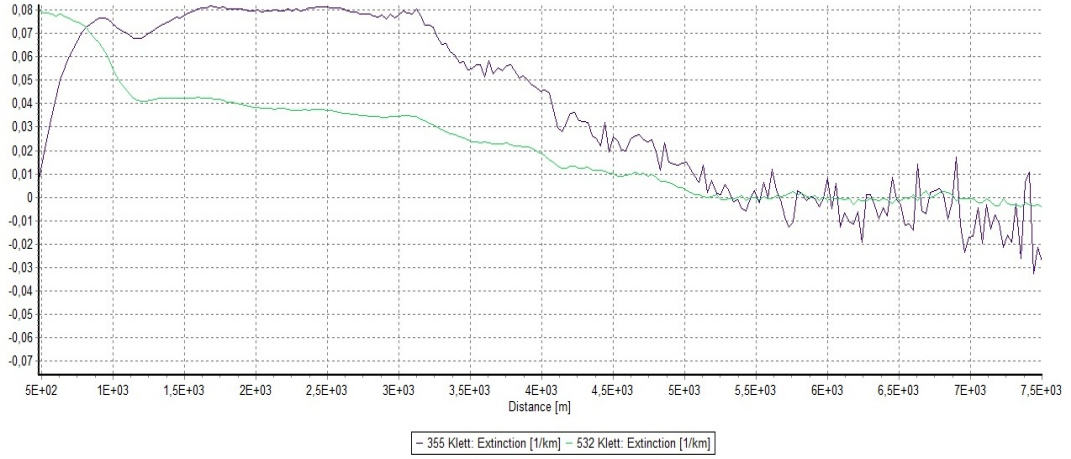
07.04.2012, 355 nm’de ışın azalımının, lidar oranı 50 alınarak Klett yöntemiyle hesaplanan renk haritası. Burada 02:00'dan sonra 10:00'a kadar alçak bir bulut teleskop açısına girmiştir.

4.2.6 02.05.2012 Tarihinde Lidar Sistemiyle Yapılan Ölçümleme



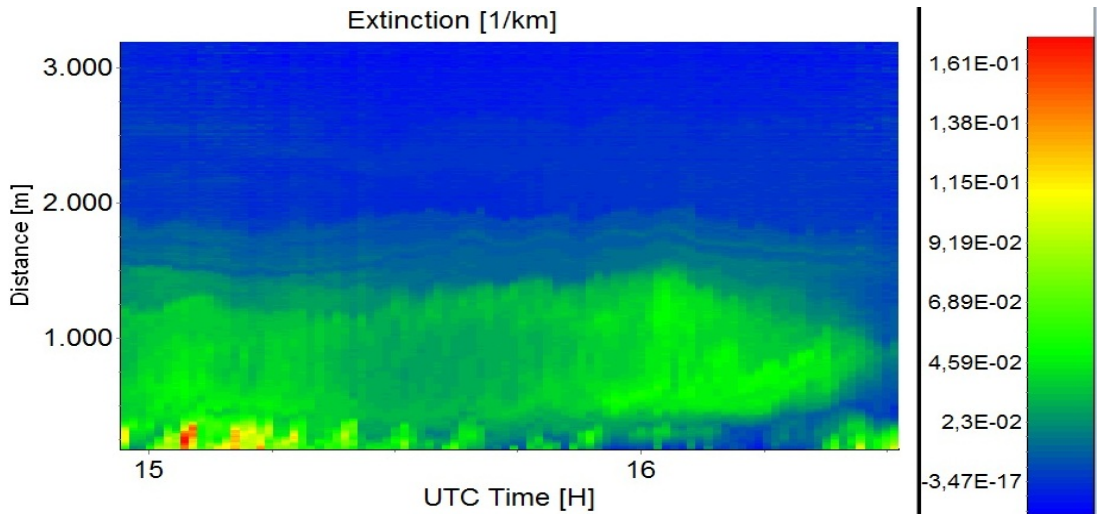
Şekil 4.22., 02.05.2012, Ortalama lidar sinyali.

Şekil 4.22'de görüldüğü üzere molekülerden ve aerosollerden farklı dalga boylarındaki geri saçılım yaklaşık 5000 m mesafeden sonra aynı düzlemedir. Söz konusu durum neticesinde aerosollerin yaklaşık 5000 m mesafeden sonra olmadığı ve yalnızca moleküllerden geri saçılımın olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 4.23., 02.05.2012, 355 nm ve 532 nm' de ışın azalımı.

02.05.2012, 355 nm ve 532 nm'de ışın azalımı, lidar oranı 50 alınarak Klett yöntemiyle hesaplanmıştır.



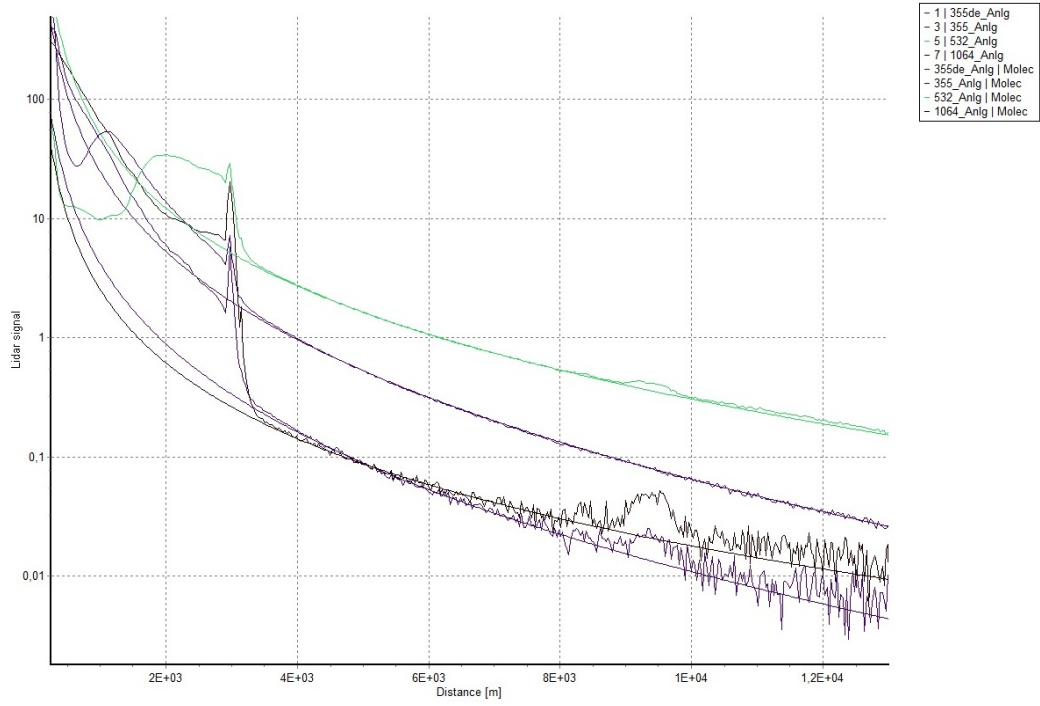
Şekil 4.24., 02.05.2012, 532 nm'de ışın azalımı renk haritası

02.05.2012, 532 nm'de ışın azalımı renk haritası, lidar oranı 50 alınarak Klett yöntemiyle hesaplanmıştır.

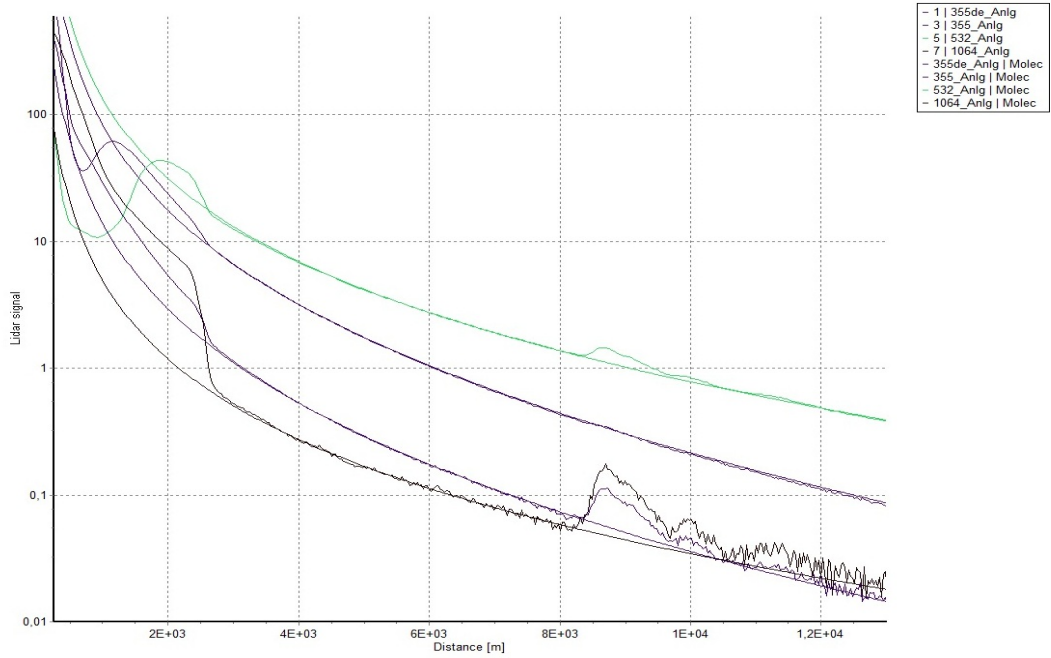
4.3 Örnek Olay incelemesi: Calipso uydusu, uçak ve TÜBİTAK MAM Raman aerosol lidarı eşzamanlı ölçümleri

CALIPSO (Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observations), Amerika Birleşik Devletleri'nin NASA (National Aeronautics and Space Administration) ve Fransa'nın CNES (Centre National d'Études Spatiales) kurumlarının ortak bir uydusudur ve 28 Nisan 2006 tarihinde bir Delta II roketiyle yörüngeye yollanmıştır. CALIPSO uydusunda şu cihazlar bulunmaktadır: (i) CALIOP (Cloud-Aerosol Lidar with Orthogonal Polarization) - aerosol ve bulut dikey dağılımını ölçümleyen yüksek çözünürlükte bir lidar; (ii) WFC (Wide Field Camera) - Ball Aerospace CT-633 yıldız takip kamerasının geliştirilmiş bir modeli; ve (iii) IIR (Imaging Infrared Radiometer) - sirüs bulut fiziksel özellikler ve partikül boyutunu ölçümleyen aygıt. CALIOP aygıtının lazer ışığı IIR aygıtının görüntüleme alanıyla ayarlanmıştır ve böylece ortak ölçümler daha optimize bir şekilde gerçekleştirilebilmektedir.

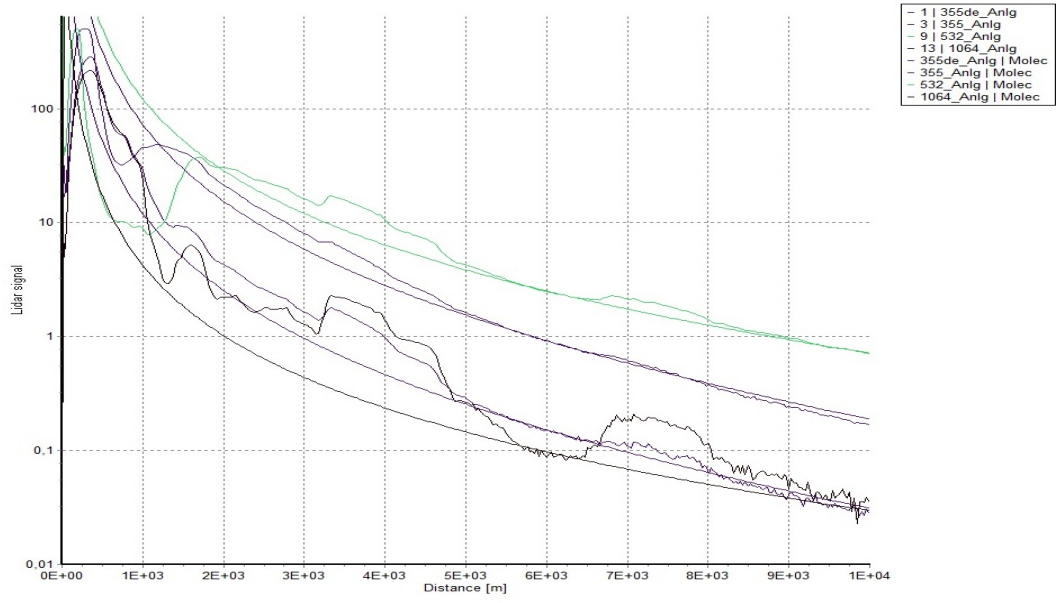
8 Eylül 2011 tarihinde Yunanistan'daki Ulusal Atina Teknik Üniversitesi, Fizik Bölümü profesörlerinden ve aynı zamanda Avrupa Aerosol Araştırmaları Lidar Ağı'nın (EARLINET-European Aerosol Research Lidar Network) temsilcisi Dr. Alex Papayannis tarafından yapılan bilgilendirilme sonrasında, CALIPSO uydusunun Türkiye-Yunanistan üzerinden geçeceği öğrenilmiş ve eş zamanlı bazı lidar ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Bu ölçümler hakkındaki detaylı bulgular aşağıda şekillerde (Şekil 4.25 – Şekil 4.30) gösterilmiştir.



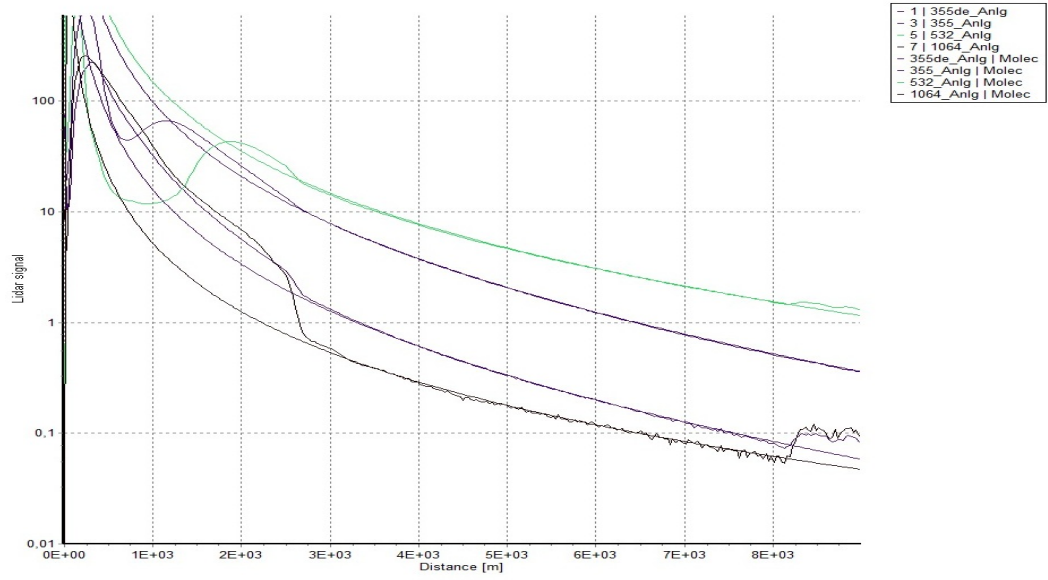
Şekil 4.25., 12:00 ile 16:00 saatleri arasında ortalama lidar sinyali.



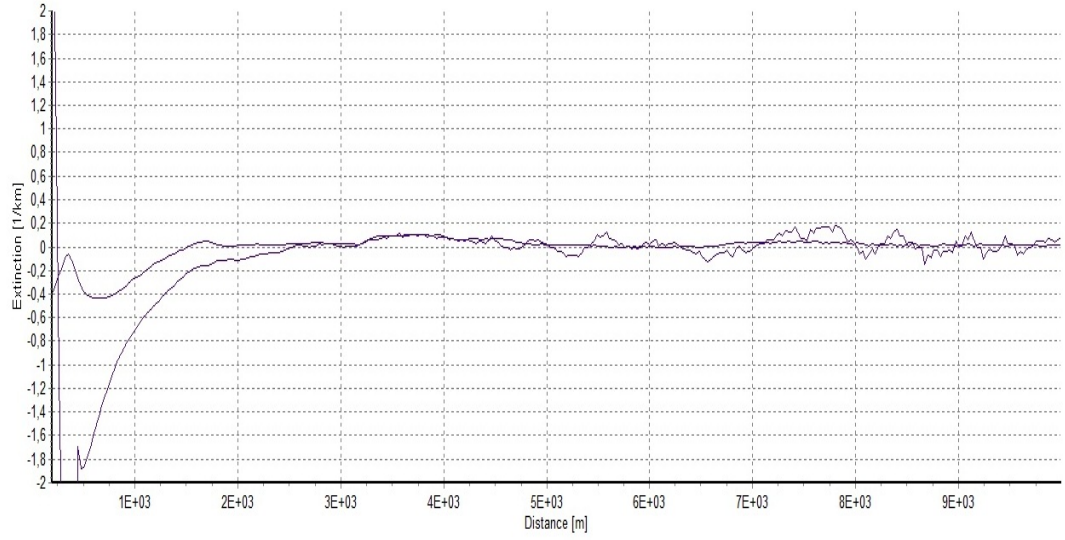
Şekil 4.26., 16:00 ile 20:00 saatleri arasında ortalama lidar sinyali.



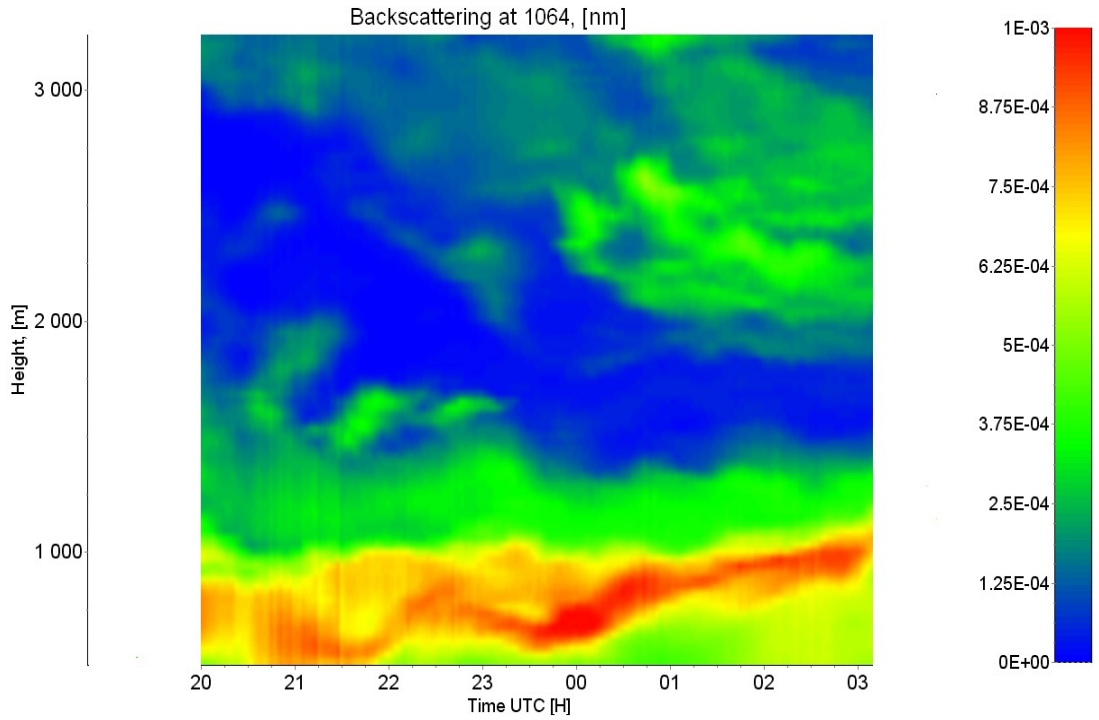
Şekil 4.27., 20:00 ile 00:00 saatleri arasında ortalama lidar sinyali.



Şekil 4.28., 00:00 ile 04:00 saatleri arasında ortalama lidar sinyali.



Şekil 4.29., Seçili zaman aralıklarında ışın azalımının Klett ve Raman yöntemleriyle hesaplarının karşılaştırılması.



Şekil 4.30., Seçili zaman aralığında aerosol geri saçılımının renk haritası.

Söz konusu örnek olay incelemesi detayları, sonuçlar ve değerlendirme bölümünde değerlendirilmiştir.

5. SONUÇLAR ve DEĞERLENDİRME

TÜBİTAK MAM'da 2009 yılı Mayıs ayı itibariyle lidar sistemiyle yapılan çalışmaların bir yılı aşkın süreci, sistemin efektifliğinin test çalışmaları ile süre gelmiştir. Söz konusu süreci takiben lidar sisteminin atmosferik aerosollerin ölçümlemesinin efektifliği ve problemsiz çalıştığı gözlenmiştir. Tez konusu çalışmada, 2011 ve 2012 yıllarına ait atmosferik aerosollerin ölçümlemeleri gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalar esnasında özellikle havanın açık olduğu günler esas alınmıştır.

Araştırma konusunun amacı, geliştirilmiş olan lidar sistemi ile Gebze ve Dilovası bölgesi hava sahasında yer alan atmosferik aerosollerin geri saçılım ve ışın azalımı katsayılarının Klett ve Raman metotları ile hesaplanması için algoritmalar kullanılarak tespitin yapılmasıdır. Bu algoritmalar gelecekte aerosollerin dikey dağılımlarının hesaplanmasında kullanılacaktır. Araştırma konusu boyunca kullanılan lidar sistemi, mevsim koşullarına bağlı hava şartlarında, aerosollerin yoğunluk ve irtifalarının tespiti için kullanılmıştır. Ancak bu tür bir araştırma konusu birkaç yıllık ölçümlemeler neticesinde daha efektif sonuçlar bizlere verecektir. Tez konusu çalışmada yapılan ölçümlemeler neticesinde elde ettiğimiz bulgulara bakılarak aşağıdaki sonuçlar ortaya çıkmıştır.

- 20 Temmuz 2011 tarihinde yapılan ölçümleme neticesinde, elde edilen verilerden çıkartılan ışın azalımı renk haritasında da görüldüğü (Şekil 4.7) üzere aerosol yoğunluğunun 1 km ve daha düşük irtifalarda yer aldığı tespit edilmiştir.
- 17 Ağustos 2011 tarihinde yapılan ölçümleme neticesinde, aerosollerden gerisaçılımın renk haritasından da görüldüğü üzere (Şekil 4.10), aerosoller iki katman halinde yer almaktadır. 1 ile 1,5 km irtifalarda yüksek yoğunlukta aerosollerin bulunduğu görülmektedir. Bunun yanı sıra, söz konusu yoğunluk 7 km civarı irtifalarda da yer

almaktadır. Ölçümleme günü göze alındığında, özellikle nemin yüksek olması ve hidrofilik aerosollerin atmosferde su buharı ile bağlanması sonucu söz konusu aerosol konsantrasyonunu artırmış olduğu gözlemlenmektedir. Buna ek olarak, yaz mevsiminde polen ve bitki kalıntıları gibi biyogenik aerosoller de aerosol konsantrasyonun artmasına sebebiyet vermektedir. Yoğun aerosol konsantrasyonun bir diğer sebebi ise, tozların Sahra Çölü'nden kaynaklı çöl tozu aerosolleri olarak EARLINET lidar ağı eş zamanlı ölçümleri neticesinde anlaşılmıştır.

- 13 Eylül 2011 tarihinde yapılan ölçümleme neticesinde, aerosol yoğunluğunun Gebze ve Dilovası bölgeleri hava sahasında 500 m ile 2000 m civarı irtifalarda aerosol yoğunluğu yapılan ölçümleme neticesinde ışın azalımı renk haritasından (Şekil 4.14) görülmektedir. Ölçümleme gününe bakıldığında özellikle 17: 00 ile 22:00 saatleri arasında 500 ila 1000 m irtifalarda aerosol yoğunluğu görülmektedir. Söz konusu durum Gebze ve Dilovası civarı hava bölge sahasında sıklıkla görülmektedir.
- 14 Mart 2012 tarihinde yapılan ölçümleme neticesinde, Şekil 4.18'de elde edilmiş ışın azalımı renk haritasında yine 500 ila 1200 m civarı uzaklıktan aerosol yoğunluğu görülmektedir.
- 07 Nisan 2012 tarihinde yapılan ölçümleme neticesinde, özellikle 02:00 ila 12:00 saatleri arasında yoğun bir aerosol bulutu saptanmıştır. Söz konusu aerosol bulutunun ölçümleme noktasına uzaklığı yaklaşık 300 ila 1000 m aralığındandır (Şekil 4.21). Saat 02:00 ila 10:00 arasında söz konusu bulut irtifası oldukça alçaktır. Şekil 4.21'de gösterilmiş olan renk haritasındaki yeşil tonlarındaki dağınıklık ve bulanıklıklar yoğun bulutlardan kaynaklanmaktadır.

- 02 Mayıs 2012 tarihinde yapılan ölçümleme neticesinde, fazla olmamak ile birlikte yine 500 ila 1200 m uzaklıklarda aerosollerin varlığı tespit edilmiştir. Gün içerisinde hava şartlarının da açık olması sebebiyle 3000 m ve üzeri mesafelerdeki ölçümler renk haritasında gösterilmemiştir.

2011 ve 2012 yıllarında ölçümleri gerçekleştirilen ve her yıldan 3'er günün baz alınması ile yapılan ölçümler neticesinde elde edilen lidar verilerinin değerlendirmeleri göstermiştir ki, özellikle Gebze ve Dilovası civarı hava sahasında var olan aerosol yoğunluğu 500 ila 1500 m mesafelerindedir. Söz konusu veri eldelerinden ileride, aerosol dikey dağılımları, etkin yarıçapları ve mikrofiziksel diğer özelliklerinin tespiti de gerçekleştirilecektir.

Tüm bu ölçümleme süreçleri esnasında, tez konusu çalışmada bir de örnek olay incelemesi gerçekleştirilmiştir. 8 Eylül 2011 tarihinde Yunanistan'daki Ulusal Atina Teknik Üniversitesi, Fizik Bölümü profesörlerinden ve aynı zamanda Avrupa Aerosol Araştırmaları Lidar Ağı'nın (EARLINET-European Aerosol Research Lidar Network) temsilcisi Dr. Alex Papayannis tarafından yapılan bilgilendirilme ile CALIPSO uydusunun Türkiye-Yunanistan üzerinden geçeceği öğrenilmiş ve eş zamanlı bazı lidar ölçümler de yapılmıştır. Seçili zaman aralığında gerçekleştirilen bu ölçümle neticesinde, yine Gebze ve Dilovası hava bölgesi civarında aerosol yoğunluğunun iki katman halinde varlığı tespit edilmiştir. Bunlardan ilki yine 500 ila 1000 m mesafede aerosollerin çok yoğun olduğu tespit edilmiştir. İkinci katman aerosol yoğunluğu ise çok fazla yüksek konsantrasyonlarda olmamak ile birlikte 2000 ila 3000 m mesafeler aralığındadır. Söz konusu ölçümler, EARLINET lidar ağında CALIPSO uydusundan alınan veriler ile doğrulaması yapılmıştır. Yapılan doğrulama çalışmaları ile TÜBİTAK MAM'da konumlandırılmış lidar sisteminin etkinliği bir kez daha tespit edilmiştir. Söz konusu çalışma ile Gebze ve Dilovası bölgesi hava sahasında Sahra tozundan kaynaklı aerosollerin varlığı da tespit edilmiştir.

Sonuç olarak, TÜBİTAK MAM’da geliştirilen lidar sistemi, ülkemize aerosol bilimi alanında yeni bir ölçümleme tekniği sunmuş bulunmaktadır. Daha düzenli ölçümlerlerin gerçekleştirilmesi ve lidar sistemine tarama modülünün entegre edilmesini takiben sistem yazılımında yapılacak yeni düzenlemeler ile aerosol mikrofiziksel özelliklerinin de tespiti gerçekleştirilebilecektir. Tüm bu söz konusu yenilemeler ile daha değerli verilerin eldesi sağlanabilecek ve ülkemizde aerosol bilimi açısından daha da büyük yenilikler sunulabilecektir.

KAYNAKLAR

- 1-Albrecht, B. A. (1989), Aerosols, cloud microphysics, and fractional cloudiness, Science, 245, 1227–1230.
- 2-Allakhverdiev, K. R., Baykara, T. K., Bekbolet, M., Huseyinoglu, M. F., Ozbek, S., Salaeva, Z., Secgin, A., Vartapetov, S., Veselovskii, I., Korenskiy, M., "Preliminary Results from the New Multiwavelength Aerosol LIDAR in Turkey", Fizika, 16 (2009), 22-25.
- 3-Ansmann, A., Riebesell, M., Wandinger, U., Weitkamp, C., Voss, E. Lahmann, W., Michaelis, W., 1992. Combined Raman elastic-backscatter lidar for vertical profiling of moisture, aerosols extinction, backscatter, and lidar ratio. Applied Physics, B55, 18-28.
- 4-Ansmann A., Tesche, M., Knippertz, P., Bierwirth, E., Althausen, D., Muller, D., Schultz, D., 2009. Vertical profiling of convective dust plumes in southern Morocco during SAMUM. Tellus, 61B, 340-353.
- 5-Arden Pope, C., Burnett, R.T., Thun, M.J., Calle, E.E., Krewski, D., Ito, k., Thurston, G.D., 2002. Lung cancer, cardiopulmonary mortality, and long-term exposure to fine particulate air pollution. J. Amer. Med. Med. Assoc. 287 (9).
- 6-Atwater, M., 1970. Planetary albedo changes due to aerosols. Science 170(3953):64-66.
- 7-Aytuğ Sivashgil, GYTE, Yüksek Lisans Tez, Gebze-Dilovası’ nda partikül madde kirliliği; Kirletici kaynakların dökümü ve partikül madde kanserojenik PAH analizi, 2007.

- 8-Bergstrom, R. W., Pilewskie, P., Russell, P. B., Redemann, J., Bond, T. C., Quinn, P. K., and Sierau, B., 2007. Spectral absorption properties of atmospheric aerosols. *Atmos. Chem. Phys.*, 7, 5937–5943.
- 9-Bohren, F.B., Huffman, D., 1983. Absorption and scattering of light by small particles, John Wiley, New York, 530-531.
- 10-Chamaillard, K., Jennings, S.G., Kleefeld, D., Light backscattering and scattering by non-spherical sea-salt aerosols, *J. Quant. Spectr. Rad. Transfer*, 79-80, 577-597, 2003.
- 11-Charlson, R. and Pilat, M., 1969: Climate: The influence of aerosols. *J. Appl. Meteorol.* 8:1001-1002.
- 12-Clarke, A., McNaughton, C., Kapustin, V., Shinozuka, Y., Howell, S., Dibb, J., Zhou, J., Anderson, B., Brekhovskikh, V., Turner, H., and Pinkerton, M.: Biomass Burning and Pollution Aerosol over North America: Organic Components and their influence on Spectral Optical Properties and Humidification Response, *J. Geophys. Res.*, 112, D12S18, doi:10.1029/2006JD007777, 2007.
- 13-Climate Change and Aerosols, <http://www.metoffice.gov.uk/climate-change/guide/science/explained/aerosols>, (Nisan 2012).
- 14-Coakley, J. Jr., Cess, R., and Yurevich, F., 1983. The effect of tropospheric aerosols on the earth's radiation budget: A parameterization for climate models. *J. Atmos. Sci.* 40:116-138.
- 15-Collaud Coen, M., Weingartner, E., Schaub, D., Hueglin, C., Corrigan, C., Henning, S., Schikowski, M., and Baltensperger, U.: Saharan dust events at the Jungfraujoch: Detection by wavelength dependence of the single scattering albedo and first climatology analysis, *Atmos. Chem. Phys.*, 4, 2465–2480, 2004, <http://www.atmos-chem-phys.net/4/2465/2004/>.

- 16-Cuesta J., Flamant, P.H., Flamant, C., 2008. Synergetic technique combining elastic backscatter lidar data and sun photometer AERONET inversion for retrieval by layer of aerosol optical and microphysical properties. *Applied Optics*, 47, 4598- 4611.
- 17-Dubovik, O., Smirnov, A., Holben, B.,N., 2000. Accuracy assessments of aerosol optical properties retrieved from AERONET sun and sky radiance measurements. *Journal of Geophysical Research*, 105, 9791-9806.
- 18-Esselborn, M., Wirth, M., Fix, A., Weinzierl, B., Rasp, K., Tesche, M., Petzold, A., 2009. Spatial distribution and optical properties of Saharan dust observed by airborne high spectral resolution lidar during SAMUM 2006. *Tellus 61B*, 131-143.
- 19-Feingold, G., Grund, C.J., 1994. Feasibility of using multi-wavelength lidar measurements to measure cloud condensation nuclei. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 11, 1543-1558.
- 20-Feingold, G., Morley, B., 2003. Aerosol hygroscopic properties as measured by lidar and comparison with in situ measurements. *Journal of Geophysical Research*, 108, 2842-2849.
- 21-Fialho, P., Hansen, A. D. A., and Honrath, R. E.: Absorption coefficients by aerosols in remote areas: A new approach to decouple dust and black carbon absorption coefficients using sevenwavelength Aethalometer data, *J. Aerosol Sci.*, 36(2), 267–282, 2005.
- 22-Finlayson-Pitts, B. J., et al., The heterogeneous hydrolysis of NO₂ in laboratory systems and in outdoor and indoor atmospheres: An integrated mechanism, *Phys. Chem. Chem. Phys.*, 5, 223– 242, 2003.
- 23-Fiocco, G. and Smullin, L. D. “Detection of scattering layers in the upper atmosphere (60– 140 km) by optical RADAR”, *Nature* 199, 1275-1276 (1963).

- 24-Fiocco, G. and Grams, G. "Observations of the Aerosol Layer at 20 km by optical Radar", *J. Atmos. Sci.* 21, 323-324 (1964).
- 25-Freudenthaler, V., Essselborn, M., Wiegner, M., Heese, B., Tesche, M., Ansmann, A., Muller, D., Althausen, D., Wirth, M., Fix, A., Ehret, G., Knippertz, P., Toledano, C., Gasteiger, J., Garhammer, M., Seefeldner, M., 2009. Depolarization ratio profiling at several wavelengths in pure Saharan dust during SAMUM 2006. *Tellus* 61B, 165-179.
- 26-Ginoux, P., Prospero, J.M., Torres, O., Chin, M., 2004. Long term simulation of global dust distribution with the GOCART model: Correlation with North Atlantic Oscillation. *Environmental Modelling & Software*, 19, 113-128.
- 27-Gorchakov, G. I., 1966. Light scattering matrices of atmospheric air, *Izv. Akad. Nauk SSSR, Fiz. Atmos. Okeana*, 2, 595-605.
- 28-Gronenberg, D.A., Witt, C., Wagner, U., Chung, K.F., Fischer, A., 2003. Fundamentals of pulmonary drug delivery. *Respiration Medicine*, 97, 79-89.
- 29-Graf, H.-F., J. Feichter and B. Langmann, 1997. Volcanic sulfur emissions: estimates of source strength and its contribution to the global sulfate distribution. *J. Geo-phys. Res.* 102, 10,727–10,738.
- 30-Hanel, G., 1976. The properties of atmospheric aerosol particles as functions of relative humidity at thermodynamic equilibrium with surrounding moist air *Adv. Geophys.*, 19 (1976), pp. 73–188 .
- 31-Hansen, A. D. A., Rosen, H., and Novakov, T.: The aethalometer – an instrument for the real-time measurement of optical absorption by aerosol particles, *Sci. Total Env.*, 36, 191–196, 1984.

- 32-Hatzianastassiou, N., Matsoukas, C., Drakakis, E., Stackhouse Jr, P. W., Koepke, P., Fotiadi, A., Pavlakis, K. G., and Vardavas, I., 2007. The direct effect of aerosols on solar radiation based on satellite observations, reanalysis datasets, and spectral aerosol optical properties from Global Aerosol Data Set (GADS). *Atmos. Chem. Phys. Discuss.*, 7, 753–783.
- 33-Haywood, J., Francis, P., Osborne, S., Glew, M., Loeb, N., Highwood, E., Tanré, D., Myhre, G., Formenti, P., Hirst, E., 2003. Radiative properties and direct radiative effect of Saharan dust measured by the C-130 aircraft during SHADE: 1. Solar spectrum. *Journal of Geophysical Research*, 108, 8577-8579.
- 34-Houghton, J.T., Ding, Y., Griggs, D.J., Noguer M., Van der Linden, P.J., Dai, X., Maskell, K., Johnson, C.A., 2001. *Climate Change 2001: The Scientific Basis*, Cambridge University Press, Cambridge.
- 35-Heintzenberg, J., 2009. The SAMUM-1 experiment over Southern Morocco: overview and introduction. *Tellus* 61B, 2-11.
- 36-Huebert, B., T. Bates, P.B. Russell, G. Shi, Y.J. Kim, K. Kawamura, G. Carmichael, and T. Nakajima, An overview of ACE-Asia: Strategies for quantifying the relationships between Asian aerosols and their climatic impacts,, *J. Geophys. Res.*, 108 (D23), 8633, doi:10.1029/2003JD003550, 2003.
- 37-International Panel on Climate Change 2001 web site, The IPCC Assessment Reports,
www.ipcc.ch/publications_and_data/publications_ipcc_fourth_assessment_report_wg1_report_the_physical_science_basis.htm (Haziran 2010).
- 38-International Panel on Climate Change 2001 web site, The IPCC Assessment Reports,
www.ipcc.ch/publications_and_data/publications_ipcc_fourth_assessment_report_wg1_report_the_physical_science_basis.htm (Aralık 2011).

- 39-Ito, A., and J.E. Penner, 2005: Historical estimates of carbonaceous aerosols from biomass and fossil fuel burning for the period 1870-2000, *Global Biogeochem. Cycles*, 19, GB2028, doi:10.1029/2004GB002374.
- 40-Jaenicke, R., 1988: Chapter 9: Aerosol physics and chemistry. *Landolt-Bornstein, New Series*, V/4b.
- 41-Kalashnikova, O.V., and I. N. Sokolik, 2004; Modeling the radiative properties of nonspherical soil-derived mineral aerosols, *J. Quant. Spectr. Rad. Transfer*, 87, 137-166.
- 42-Klett, J.D., 1981. Stable analytical inversion solution for processing lidar returns. *Applied Optics*, 20, 211-220.
- 43-Kokhanovsky, A.A., 2004; Optical Properties of terrestrial clouds, *Earth-Sciences Reviews*, 64, 189-241.
- 44-Kokhanovsky, A.A., 2008 ; *Aerosol Optics : Light Absorption and Scattering by Particles in the Atmosphere*.
- 45-Kovalev, V. A. and Eichinger, W. E., *Elastic Lidar: Theory, Practice, and Analysis Methods*, John Wiley & Sons, Hoboken, 2004.
- 46-Kulmala, M., Riipinen, I., Sipila, M., Manninen, H. E., Petaja, T., Junninen, H., Dal Maso, M., Mordas, G., Mirme, A., Vana, M., Hirsikko, A., Laakso, L., Harrison, R. M., Hanson, I., Leung, C., Lehtinen, K. E. J., and Kerminen, V. M.: Toward direct measurement of atmospheric nucleation, *Science*, 318, 89–92, 2007.
- 47-Lacis, A.A., and Mischenko, M.I., 1995. Climate forcing, climate sensitivity and climate response: A radiative modelling perspective on atmospheric aerosols. In: *Aerosol Forcing of Climate*, Chichester: Wiley.

- 48-Liao, H. and Seinfeld, J. H.: Effects of clouds on direct aerosol radiative forcing of climate, *J. Geophys. Res.*, 103, 3781–3788, 1998.
- 49-Liao, H. and J.H. Seinfeld, Radiative forcing by mineral dust aerosols: Sensitivity to key variables, *J. Geophys. Res.*, 103, 31,637-31,645, 1998.
- 50-Lidar uk., Nisan, 2012. <http://www.lidar-uk.com/a-brief-history-of-lidar>.
- 51-Liu, Z.Y., Omar, A., Vaughan, M., Hair, J., Kittaka, J., Hu, Y., Powell, K., Trepte, C., Winker, D., Hostetler, C., Ferrare, R., Pierce, R., 2008. CALIPSO lidar observations of the optical properties of Saharan dust: A case study of long-range transport. *Journal of Geophysical Research*, 113, 72-77.
- 52-MacKinnon, D.J., 1969. The effect of hygroscopic particles on the backscattered power from a laser beam. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 26, 500-510.
- 53-McCormick, R., and J. Ludwig, 1967: Climate modification by atmospheric aerosols. *Science* 156(3780):1358-1359.
- 54-Meehl, G.A., and C. Tebaldi, 2004: More intense, more frequent and longer lasting heat waves in the 21 st century, *Science*, 305, 994-997.
- 55-Meloni, D., di Sarra, A., Pace, G., and Monteleone, F.: Aerosol optical properties at Lampedusa (Central Mediterranean). 2. Determination of single scattering albedo at two wavelengths for different aerosol types, *Atmos. Chem. Phys.*, 6, 715–727, 2006, <http://www.atmos-chem-phys.net/6/715/2006/>.
- 56-Mishchenko, M.I., Lacis, A.A., Carlson, B.E., Travis, L.D., 1995. Nonsphericity of dust-like tropospheric aerosols: Implications for aerosol remote sensing and climate modeling. *Geophysical Research Letters*, 22, 1077-1080.
- 57-Mishchenko, M. I., Hovenier, J.W., Travis, L.D. (Eds), 2000. *Light Scattering by Nonspherical Particles*, Academic Press, San Diego.

- 58-Mishchenko, M.I., Travis, L.D., Lacis, A.A. (Eds), 2002. Scattering, Absorption, and Emission of Light by Small Particles, Cambridge University Press, Cambridge
- 59-Mitchell, J. Jr., 1971: "The effect of atmospheric aerosols on climate with special reference to temperature near the Earth's surface. J. Appl. Meteorol. 10:703-714.
- 60-Müller, D., Wandinger, U., Ansmann, A., 1999. Microphysical particle parameters from extinction and backscatter lidar data by inversion with regularization: Theory. Applied Optics, 38, 2346-2357.
- 61-Müller, D., Ansmann, A., Wagner, F., Franke, K., Althausen, D., 2002. European pollution outbreaks during ACE 2: Microphysical particle properties and single-scattering albedo inferred from multi-wavelength lidar observations. Journal of Geophysical Research, 107, 1110-1114.
- 62-Olofson Frans, 2008. Doctor of philosophy thesis, Faculty opponent is Associate Professor Richard L. Collins Geophysical Institute University of Alaska, Fairbanks, USA.
- 63-Pahlow, M., Feingold, G., Jefferson, A., Andrews, E., Ogren, J.A., Wang, J., Lee, Y.-N., Ferrare, R.A., Turner, D.D., 2006. Comparison between lidar and nephelometer measurements of aerosol hygroscopicity at the Southern Great Plains Atmospheric Radiation Measurement site. Journal of Geophysical Research, 111, 646-649.
- 64-Patterson, E.M., Optical properties of the crustal aerosol: relation to chemical and physical characteristics, J. Geophys. Res., 86, 3236-3246, 1981.
- 65-Pincus, R., Baker, M.B., 1994. Effect of precipitation on the albedo susceptibility of clouds in the marine boundary layer. Nature, 372, 250-252.

- 66-Pöschl, U., 2005. Atmospheric aerosols: Composition, transformation, climate and health effects. *Angewandte Chemie International Edition*, 44, 7520-7540.
- 67-Rissler, J., Vestin, A., Swietlicki, E., Fisch, G., Zhou, J., Artaxo, P., and Andreae, M.O., (2006), Size Distribution and Hygroscopic Properties of Aerosol Particles From Dry-Season Biomass Burning in Amazonia, *Atmos. Chem. Phys* 6 471-491.
- 68-Robock, Alan, 2002: Pinatubo eruption: The climatic aftermath, *Science*, 295, 1242-1244.
- 69-Sandro Fuzzi, Meinrat O., Andreae, Barry J. Huebert, Markku Kulmala, Tami C. Bond, Michael Boy, Sarah J. Doherty, Alex Guenther, Maria Kanakidou, Kimitaka Kawamura, Veli-Matti Kerminen, Ulrike Lohmann, Lynn M. Russell, Ulrich Pösch., Critical assessment of the current state of scientific knowledge, terminology, and research needs concerning the role of organic aerosols in the atmosphere, climate, and global change.
- 70-Seinfeld, J., Pandis, S.N., 2006. *Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change*, Second Edition, John Wiley and Sons, Inc.
- 71-Sinyuk, A., O. Torres, and O. Dubovik, Combined use of satellite and surface observations to infer the imaginary part of the refractive index of Saharan dust, *Geophysical Research Letters*, 30 (2), 1081, doi:10.1029/2002GL016189, 2003.
- 72-Sokolik, I.N., Winker, D.M., Bergametti, G., Gilett, D.A., Carmichael, G., 2001. Introduction to special section: Outstanding problems in quantifying the radiative impacts of mineral dust. *Journal of Geophysical Research*, 106, 18.015-18.027.
- 73-Springer, Berlin, 391-457. Finlayson-Pitts, "Chemistry of the upper and lower Atmosphere", London, Academic Press (2000), p.969.

- 74-Tanré, D., Haywood, J., Pelon, J., Leon, J.F., Chatenet, B., Formenti, P., Francis, P., Goloub, P., Highwood, E.J., Myhre, G., 2003. Measurement and modeling of the Saharan dust radiative impact: Overview of the Saharan Dust Experiment (SHADE). *Journal of Geophysical Research*, 108, 8574.
- 75-Tesche, M., Ansmann, A., Muller, D., Althausen, D., Mattis, I., Heese, B., Freudenthaler, V., Wiegner, M., Esselborn, M., Pisani, G., Knippertz, P., 2009. Vertical profiling of Saharan dust with Raman lidars and airborne HSRL in southern Morocco during SAMUM. *Tellus* 61B, 144-164.
- 76-Tikhonov, A.N., Arsenin, V.Y. (Eds), 1977. *Solution of Ill-Posed Problems*, Wiley, New York.
- 77-Torres, O., Bhartia, P. K., Sinyuk, A., Welton, E. J., and Holben, B.: Total Ozone Mapping Spectrometer measurements of aerosol absorption from space: Comparison to SAFARI 2000 ground-based observations, *J. Geophys. Res.*, 110, D10S18, doi:10.1029/2004JD004611, 2005.
- 78-Tsigairidis, K., et al., 2006: Change in global aerosol composition since preindustrial times, *Atmos. Chem. Phys.*, 6, 5143-5162.
- 79-Twomey, S. (1974), Pollution and the planetary albedo, *Atmos. Environ.*, 8, 1251–1256.
- 80-Twomey, S. (Ed), 1977. *Introduction to the Mathematics of Inversion in Remote Sensing and Direct Measurements*, Elsevier, New York.
- 81-University of Sussex , Department of Geography, www.sussex.ac.uk/geography/research/clusters/climateresearch/aerosols (Nisan, 2012).

- 82-Veselovskii, I.A., Kolgotin, A., Griaznov, V., Müller, D., Wandinger, U., Whiteman, D.N., 2002. Inversion with regularization for the retrieval of tropospheric aerosol parameters from multiwavelength lidar sounding. *Applied Optics*, 41, 3685-3699.
- 83-Wang, M. and Penner, J. E. , 2009. Aerosol indirect forcing in a global model with particle nucleation. *Atmos. Chem. Phys.*, 9, 239-260.
- 84-Wang, M., Penner, J. E., and Liu, X.: The coupled IMPACT aerosol and NCAR CAM3 climate model: evaluation of predicted aerosol number and size distribution, *J. Geophys. Res.*, doi:10.1029/2008JD010459, in press, 2009.
- 85-WCP-112 1986; A Preliminary Cloudless Standard Atmosphere for Radiation Computation. Geneva: World Meteorological Organization.
- 86-Weitkamp, C., (Ed), 2002. *Lidar: Range-Resolved Optical Remote Sensing of the Atmosphere*, Springer, USA.
- 87-Whitby, K.T., Cantrell, B.K., 1976. Atmospheric aerosols: characteristics and measurement. In: *Proceedings of the International Conference on Environmental Sensing and Assessment (ICESA)*, Institute of Electrical and Electronic Engineers (IEEE). IEEE #75-CH 1004-1, ICESA paper 29-1, Washington, DC: IEEE. p. 6.
- 88-Wiegner, M., Gasteiger, J., Kandler, K., Weinzierl, B., Rasp, K., Esselborn, M., Freudenthaler, V., Heese, B., Toledano, C., Tesche, M., Althausen, D., 2009. Numerical simulations of optical properties of Saharan dust aerosols with emphasis on lidar applications. *Tellus* 61B, 180-194.
- 89-Xie, C., Nishizawa, T., Sugimoto, N., Matsui, I., Wang, Z., 2008. Characterization of aerosol optical properties in pollution and Asian dust episodes over Beijing, China, *Applied Optics*, 47, 4945-4951.

- 90-Yang, W, Peters, J.I., Williams III, R.O., 2008. Inhaled nanoparticles: A current review. *International Journal of Pharmaceutics*, 356, 239-247.
- 91-Yu H., Y. Kaufman, M. Chin, G. Feingold, L. Remer, T. Anderson, Y. Balkanski, N. Bellouin, O. Boucher, S. Christopher, P. DeCola, R. Kahn, D. Koch, N. Loeb, M. S. Reddy, M. Schulz, T. Takemura, and M. Zhou, 2006: A review of measurement-based assessments of aerosol direct radiative effect and forcing. *Atmos. Chem . Phys.* 6:613-666.

ÖZGEÇMİŞ

3 Aralık 1980 İstanbul doğumludur. Orta öğrenim ve lise öğrenim hayatını Özel Anabilim Koleji'nde tamamlamasını takiben, üniversite öğrenimine 1999 yılında Sakarya Üniveristesi Mühendislik Fakültesi Çevre Mühendisliği Bölümünde başladı ve 2003 yılında mezun oldu. Askerlik hizmeti sonrası, sırası ile Fresenius Medical Care firmasına bağlı Delta Medikal firmasında, Su Arıtma Sistemleri üzerine Teknik Servis Müdür Yardımcısı, Hijyen Ekspres A.Ş.'de endüstriyel tıp hijyenik ürünler satışı amacı ile Bölge Satış Sorumlusu olarak çalıştı. Hali hazırda, 2008 yılında göreve başlamış olduğu TÜBİTAK MAM Malzeme Enstitüsü Lazer ve Lidar Laboratuvarları'nda atmosferik aerosollerin incelenmesi amaçlı çalışmalar gerçekleştirerek araştırmacılık görevine devam etmektedir.

