

2003_374



TÜRKİYE BİLİMSEL VE
TEKNİK ARAŞTIRMA KURUMU

THE SCIENTIFIC AND TECHNICAL
RESEARCH COUNCIL OF TURKEY

**AFRİKA TOZLARININ DOĞU AKDENİZ
BASENİNDEKİ BİYOJEOKİMYASAL ETKİSİNİN
YER ÖLÇÜMLERİ VE UYDU GÖZLEMLERİ
İLE DEĞERLENDİRİLMESİ**

46453

PROJE NO: 100Y121

Yer Deniz ve Atmosfer Bilimleri Araştırma Grubu

Earth Marine and Atmospheric Sciences
Researches Grant Group

**AFRİKA TOZLARININ DOĞU AKDENİZ
BASENİNDEKİ BİYOJEOKİMYASAL ETKİSİNİN
YER ÖLÇÜMLERİ VE UYDU GÖZLEMLERİ
İLE DEĞERLENDİRİLMESİ**

46453

PROJE NO: 100Y121

1-42

(57)

**DOÇ. DR. NİLGÜN KUBİLAY
ARAŞTIRMA GÖR. TÜLAY ÇOKACAR
PROF. DR. TEMEL OĞUZ**

70, En

ŞUBAT 2003

ERDEMLİ/MERSİN

ÖNSÖZ

Doğu Akdeniz baseni oligotropik yapısı ve darbeler halinde önemli miktarlarda taşınan Afrika tozlarına (mineral toz) maruz kalması nedeni ile mineral toz ve fitoplankton etkileşimlerinin araştırılmasında doğal bir laboratuvar niteliği taşımaktadır. Afrika tozlarının yağmur ile yıkanarak ve/veya kuru çökeltme mekanizmaları ile deniz yüzeyine ulaşması sonucunda içerdiği fosfat ve demir gibi besin tuzları biyolojik açıdan kullanılabilir olan çözülmüş forma dönüşmektedir. Böylece su kolonu içindeki biyolojik üretimin ilk halkası olan fitoplankton patlamaları ortaya çıkmaktadır.

Günümüz deniz bilimleri araştırmacıları tarafından oldukça tartışılan ve üzerinde araştırmalar yapılan bu olayın araştırılması için gereken bulguların uzun dönemli ve geniş uzay ölçeğinde toplanabilmesi ancak uzaktan algılama metodu ile mümkündür. Eylül 1997 tarihinden bu yana kesintisiz veri toplayan SeaWIFS (**Sea-viewing Wide Field-of-view Sensor**) algılayıcısı, mineral toz – fitoplankton etkileşimlerinin araştırılmasında yeni bir çığır açmıştır. Bu algılayıcıdan elde edilen ham veriler çeşitli algoritmalar yardımı ile işlenerek, hem denizler üzerindeki atmosfere taşınan mineral tozun ve hemde fitoplanktonların biyokütlesinin göstergesi olan klorofil pigmentinin uzay ölçeğinde dağılımı ve miktarı belirlenmektedir.

TÜBİTAK ile Fransa Ulusal Bilimsel Araştırma Merkezi (Centre National de la Recherche Scientifique-CNRS) arasındaki işbirliği çerçevesinde Araştırma Projeleri Destekleme Programı tarafından desteklenen burada kesin raporunu sunduğumuz araştırma projesinin amacı, SeaWIFS algılayıcısından elde edilen verilerin Akdeniz şartlarına uygun algoritmalar ile işlenerek klimatolojik mineral toz ve klorofil dağılımının ve miktarının elde edilmesidir. Bu iki ayrı parametre arasında var olduğu öngörülen ilişki ortaya çıkarılarak Afrika kaynaklı mineral tozların Akdeniz ekosistemi üzerindeki olası etkisinin gösterilmesi hedeflenmiştir.

ODTÜ-Deniz Bilimleri Enstitüsü'nde yürütülen bilimsel araştırmalara, ve Tülay Çokacar'ın doktora çalışmasına katkısı olan bu projeyi destekleyen Türkiye Bilimsel ve Teknik Araştırma Kurumu'na ve saha çalışmalarından elde edilen klorofil verilerinin bu proje çerçevesinde kullanılmasını sağlayan ODTÜ-Deniz Bilimleri Enstitüsü Kimyasal Oşinografi Ana Bilim Dalı'na teşekkür ederiz.

ÖZET

İklim değişimi, artan antropojenik etkiler ve Afrika tozlarına maruz kalan Akdeniz Havzası okyanus rengini algılayan sensörlerin verileri ile alg biyokütlesindeki gelişmeyi izlemek için uygun bir test alanıdır. Bu amaç dahilinde başlangıç olarak uzaktan algılama verileri ile türetilen verilerin gözlemlerle doğrulanması gerekmektedir.

Bu araştırma çerçevesinde SeaWIFS bulguları ile türetilen aerosol ve klorofil bilgileri ODTÜ-Deniz Bilimleri Enstitüsü'nde gerçekleştirilen gözlem sonuçları ile karşılaştırılarak doğrulukları kontrol edilmiştir. SeaWIFS'in standart algoritması orta ve yüksek klorofil derişimlerinde ($\geq 0.2 \text{ mg m}^{-3}$) oldukça başarılı sonuçlar üretmektedir. Ancak, düşük klorofil derişimlerinde ($< 0.15 \text{ mg m}^{-3}$) türetilen klorofil derişimleri ölçülen değerlerden yaklaşık 5 kat daha fazladır. Uzaktan algılama ve ölçüm bulguları arasında gözlenen farklılaşma standart atmosferik temizleme ve biyo-optik algoritmalarının Akdeniz bölgesine uygun olmamasından kaynaklanmaktadır. Bu araştırmada atmosferik temizleme işlemi için yeni bir yaklaşım önerilmiştir. Bu yaklaşım ile atmosfer katkısının temizlenmesi ve klorofil türetilmesi eş zamanlı gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar atmosferde çöl tozlarının bulunduğu durumda kullanılan metodun okyanus rengi verilerinin işlenerek bilgiye dönüştürülmesinde ümit verici olmuştur.

Anahtar Kelimeler: Akdeniz, SeaWIFS, okyanus rengi, Afrika tozları, klorofil

ABSTRACT

The Mediterranean Basin, subject both to climate changes to increasing anthropogenic inputs as well as sporadic pulses of dust from North Africa, is an appropriate test site for observing the evolution of algal biomass by utilizing ocean color data. With this aim it is first necessary to compare the satellite data with in situ available data.

Throughout present study the quality of SeaWiFS aerosol and chlorophyll products over the eastern Mediterranean Basin, during the year 2000, has been checked by comparison with in situ measurements performed at the Institute of Marine Sciences-Middle East Technical University. It appears from such a comparison that the estimates of SeaWiFS' standart algorithm are in rather good agreement for moderate and high chlorophyll concentrations ($\geq 0.2 \text{ mg m}^{-3}$). Conversely, a bias is clearly apparent at low chlorophyll values ($< 0.15 \text{ mg m}^{-3}$), with SeaWiFS estimates higher than in situ measurements by about a factor of 5. The bias appearing between satellite and in situ chlorophyll concentrations appears to originate both from errors in atmospheric corrections and from inadequate bio-optical algorithms. We have applied a new approach to atmospheric correction in which the atmosphere is removed and chlorophyll concentrations are derived simultaneously. The results indicate that the methodology shows considerable promise for process ocean color imagery in the presence of mineral dust in terms of increased coverage and more reliable pigment retrievals.

Key Words: Mediterranean, SeaWiFS, ocean color, African mineral dust, chlorophyll

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

	Sayfa
ÖNSÖZ.....	I
ÖZET.....	II
ABSTRACT.....	III
İÇİNDEKİLER DİZİNİ.....	IV
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	V
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Uzaktan Algılama ve Deniz Bilimleri Alanında Uygulanması.....	1
1.2. Akdeniz ve Uzaktan Algılama (Deniz Rengini Kayıt Eden Sensörler).....	8
1.2.1. Akdeniz'in Genel Özellikleri.....	8
1.2.2. Akdeniz'de Gerçekleştirilen Uzaktan Algılama Araştırmaları.....	12
2. MATERYAL VE METOD.....	13
3. SONUÇLAR.....	21
3.1. SeaWIFS Verileri ile Türetilen Akdeniz'in Biyo-optik Özellikleri.....	21
3.2. SeaWIFS Sensörünün Kayıt Ettiği Verilerden Türetilen Klorofil ve Aerosollerin Optik Kalınlığı Verilerinin Yer Ölçümleri ile Karşılaştırılması.....	24
3.3. Akdeniz Atmosferinde Çöl Tozlarının Bulunduğu Durumlarda SeaWIFS Sensörü Verileri ile Türetilen Biyo-optik Parametreler.....	27
3.4. Deniz Atmosfer Etkileşiminin Gösterilmesi Amacı ile Uzaktan Algılama Metodunun Kullanılması.....	33
4. TARTIŞMA.....	35
5. ÖNERİLER.....	42
6. REFERANSLAR.....	43

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 3.7.	11 ve 13 Nisan 1998 tarihine ait uzaktan algılama görüntüleri (a) SeaWIFS'in standart algoritması ile türetilen aerosollerin optik kalınlığı; (b) SMA algoritması ile türetilen klorofil dağılımı.....	Sayfa
Şekil 1.1.	SeaWIFS sensöründen elde edilen verilerden türetilen mevsimsel klorofil derişiminin küresel ölçekte gösterilmesi.....	3
Şekil 1.2.	SeaWIFS verileri ile türetilmiş olan aerosollerin optik özelliklerinin küresel dağılımı. (a) ve (b) Nisan ve Ekim 1998 ayları için aerosollerin optik kalınlığı (τ); (c) ve (d) Nisan ve Ekim 1998 ayları için Angstrom katsayısı (α).....	6
Şekil 1.3.	Çöl tozunun Akdeniz üzerine taşınımını gösteren SeaWIFS görüntüleri (a) ve (b) http://visibleearth.nasa.gov/cgi-bin/results (c) SeaWIFS verilerinden üretilen klorofil dağılımı (Eylül 1997) (c) (Turley, 1999) SeaWIFS verilerinden üretilen bitki örtüsü dağılımı (Eylül 1997) (d) (Turley, 1999).....	10
Şekil 2.1.	Uydu seviyesinde kayıt edilen ışımaya miktarının elektromanyetik spektrumun farklı dalga boylarındaki dağılımı. (a) atmosferde sadece ışınları saçma özelliği bulunan aerosollerin olduğu durum. (b) atmosferde bulunan aerosollerin ışınları saçmanın yanısıra mavi-yaşıl dalga boylarında soğurma yaptığı durum.....	15
Şekil 2.2.	Afrika kıyısında Atlantik okyanusu üzerine taşınan çöl tozlarının SeaWIFS ile algılanan biyo-optik özellikleri (Moulin ve diğ., 2001a ve b' den alınmıştır)..	17
Şekil 2.3.	Ekim 2002 tarihine ait SeaWIFS görüntüleri.....	19
Şekil 3.1.	Aerosollerin optik kalınlığının Akdeniz baseni üzerindeki aylık dağılımı.....	21
Şekil 3.2.	Angstrom katsayısının Akdeniz baseni üzerindeki aylık dağılımı.....	22
Şekil 3.3.	Klorofil pigmentinin Akdeniz yüzeyindeki aylık dağılımı.....	24
Şekil 3.4.	Yer ölçüm istasyonları ve uzaktan algılama verilerinin türetildiği alanın harita üzerinde gösterimi.....	25
Şekil 3.5.	2000 yılı için uzaktan algılama verilerinin yer ölçümleri ile karşılaştırılması. (a) Aerosollerin optik kalınlığı;(b) Klorofil derişimi.....	26
Şekil 3.6.	11 Nisan 1998 gününe ait SeaWIFS sensöründen elde edilen bilgiler (a) Doğu Akdeniz'in uzaktan algılanan rengi (true color) (b) SeaWIFS'in standart algoritması ile türetilen aerosollerin optik kalınlığı (τ) (c) SeaWIFS'in standart algoritması ile türetilen klorofil dağılımı.....	27

- Şekil 3.7.** 11 ve 13 Nisan 1998 günlerine ait uzaktan algılama bulguları.
 (a) SeaWIFS'in standart algoritması ile türetilen aerosollerin optik kalınlığı (b) SMA algoritması ile türetilen klorofil dağılımı.....29
- Şekil 3.8.** Nisan 2000'in ilk yarısında Akdeniz'e taşınan çöl tozu.
 (a) TOMS sensörünün kayıt ettiği verilerden türetilen aerosol indisi (<ftp://jwocky.gsfc.nasa.gov/pub/tmp/meduse/>) (b) SeaWIFS sensörünün 865 nm dalga boyunda kaydettiği verilerden hesaplanmış olan aerosollerden kaynaklanan ışıma (ρ_a).....30
- Şekil 3.9.** Kuzey Afrikadan (3 Nisan 2000) ve Arap yarımadasından (18 Nisan 2000) kaynaklanan çöl tozlarına (aerosollere) ait ışıma miktarının (ρ_a) dağılımı.....31
- Şekil 3.10.** 1998, 1999 ve 2000 yılları Nisan aylarına ait SeaWIFS ile ölçülen aerosollerden kaynaklanan ışıma değerleri (a) ile standart (b) ve SMA (c) algoritmaları ile türetilen klorofil derişiminin Akdeniz basenindeki dağılımı.....32
- Şekil 3.11.** 1998 yılında Erdemli aerosollerinde ölçülen MSA (siyah çizgiler) ve Al (kırmızı çizgiler) derişimlerinin bahar ve yaz aylarındaki dağılımı. Günlük yağış miktarı noktalı barlar ile gösterilmiştir. Erdemli istasyonunun Karadeniz üzerinden kaynaklanan hava kütlelerinden etkilendiği dönemler kesikli çizgi ile gösterilen barlar ile tanımlanmıştır.....33
- Şekil 3.12.** Mayıs-Temmuz 1998 dönemine ait SeaWIFS sensörünün 8 günlük komposit verilerinden türetilen Karadeniz'in yüzey sularındaki kokolit dağılımı. (a) Mayıs sonu; (b) Haziran başı; (c) Haziran ortası; (d) Haziran sonu; (e) Temmuz başı; (f) Temmuz ortası. Haritalar üzerinde siyah renk ile boyanan bölgeler kokolit patlamalarının olduğu alanları, gri renkli bölgeler kokolit patlamalarının olmadığı alanları ve beyaz renkli bölgeler ise bulut ile kaplı alanları tanımlamaktadır.....35
- Şekil 4.1.** METEOSAT uydusu verilerinden türetilen çöl tozlarına ait optik kalınlığın Akdeniz baseni üzerindeki dağılımı36
- Şekil 4.2.** Akdeniz atmosferinde çöl tozunun bulunma ihtimalini gösteren fonksiyonun mevsimsel dağılımı (Israelevich ve diğ., 2002'den alınmıştır). (a) Doğu Akdeniz; (b) Batı Akdeniz.....38

	Sayfa
Şekil 4.3.	
2000 yılında ölçülen klorofil derişimlerinin SeaWIFS ile türetilen klorofil derişimleri ile karşılaştırılması.....	39
Şekil 4.4.	
Zaman serisi klorofil ölçümlerinin SeaWIFS'in standart algoritması ile türetilen klorofil derişimleri ile karşılaştırılması (kırmızı renk SeaWIFS , yeşil renk ise ölçülen klorofil derişimlerine aittir).....	40
Şekil 4.5.	
SeaWIFS'in standart algoritması ile türetilen aerosollerin optik kalınlığı (siyah yıldız) ve klorofil derişimlerinin (kırmızı daire) zaman serisi karşılaştırılması. Günlük yağış miktarları bar ile gösterilmiştir.....	41

bu bir zaman diliminde kesin miktarlarda bilgi elde edilmeye imkânında. Örneğin, uzaktan algılama metodu bu tip verileri uzay ve zaman ölçüsünde daha kapsamlı olarak elde etmekte ve böylece denizlerdeki fiziksel, biyolojik ve jeolojik olayları daha detaylı bir şekilde anlayabilmemiz için oldukça önemli bir katkıda bulunmuştur.

İnternette okyanusların yüzeyinden yansıyan güneş ışınlarının yitilmesini elektromanyetik yansımaların farklı band aralıklarında aynı edilmeye özelliğine sahip sensörlerden (ocyanus için) elde edilen verilerin, Deniz Bilimleri alanında gerçekleştirilen araştırmalarda kullanılmaya oldukça yaygınlaşmıştır. Deniz ile okyanuslar arasındaki geçişten (özellikle kıyılarda) oluşan farklı tonları, uydular aracılığıyla yakından uzaktan sensörler (ocyanus için) ile algılanabilmektedir. Bu sensörlerin denizlerin yüzeyinden geçerken kayıtları çok hızlı bir şekilde çarpıp geri yansıyan güneş ışınlarına yitilmeye ait veriler uygun biyo-optik algoritmalar ile işlenerek, denizlerdeki besin zincirinin ilk halkası olan mikroskobik canlıların (fitoplankton), askarya yüklerinin (sediment) ve çözünmüş organik maddelerin oranı ve veya oran değişimlerinin veren bilgilere dönüştürülebilmektedir. Deniz ortamında yaşayan ve ilk olarak canlılar olan bakteriyel planktonlar (fitoplankton), güneş ışığı ve ortamdaki besin maddeleri kullanılarak inorganik karbonu organik karbona dönüştürülebilen fotosentez yapabilen canlılardır. Bu canlılar fotosentez yaparak oksijen üretirler. Bu oksijenin bir kısmı suya çözünür (vis) bölgesinde bazı dalga hareketleri nedeniyle suya karışarak oksijen miktarındaki renk değişimini kayıt ederler. Bu oksijen miktarı, suya karışan oksijen miktarı, yağışın ve miktarı hakkında bilgi getirebilmektedir. Örneğin, gibi organik maddelerin oksijen miktarı ve dolayısıyla klorofil derişimi düşük ortamlarda karbon rengi bazı mavi, kırmızı gibi organik maddelerin yüksek miktarı denizlerin renk değişimi ve bu değişim zamanla

1. GİRİŞ

1.1. Uzaktan Algılama ve Deniz Bilimleri Alanında Uygulanması

Deniz Bilimleri alanında, uzaktan algılama metodu kullanılarak elde edilen temel parametreler okyanus rengi (ocean color), deniz suyu yüzey sıcaklığı (sea surface temperature, SST), deniz seviyesi değişimi (sea surface height) ve yüzey dalgaları (surface roughness) olarak özetlenebilir. Anılan parametrelerin araştırma gemileri ile yerinde ölçülmesi hem yüksek maliyetli ve çok emek isteyen bir iş hem de sadece belirli noktalarda ve belirli bir zaman diliminde kısıtlı miktarlarda bulgu elde edebilme yöntemidir. Öte yandan, uzaktan algılama metodu bu tip verileri uzay ve zaman ölçeğinde daha kapsamlı olarak verebilmekte ve böylece denizlerdeki fiziksel, biyolojik ve jeolojik olayları daha detaylı bir şekilde anlayabilmemiz için oldukça önemli bir katkıda bulunmaktadır.

Günümüzde okyanusların yüzeyinden yansıyan güneş ışınlarının şiddetini elektromanyetik spektrumun farklı bant aralıklarında kayıt edebilme özelliğine sahip sensörlerden (ocean color) elde edilen verilerin, Deniz Bilimleri alanında gerçekleştirilen araştırmalarda kullanılması oldukça yaygınlaşmıştır. Uçak ile okyanuslar üzerinden geçerken gördüğümüz mavinin çeşitli tonları, uydular üzerine yerleştirilen hassas sensörler (ocean color sensors) ile uzaktan algılanabilmektedir. Bu sensörlerin denizlerin üzerinden geçerken kayıt ettikleri yeryüzüne çarpıp geri yansıyan güneş ışınlarının şiddetine ait veriler uygun biyo-optik algoritmalar ile işlenerek, denizlerdeki besin zincirinin ilk halkası olan mikroskobik canlıların (fitoplanktonlar), askıda yüklerin (sediments) ve çözünmüş organik maddelerin nitel ve/veya nicel dağılımlarını veren bilgilere dönüştürülebilmektedir. Deniz ortamında yaşayan ve tek hücreli canlılar olan bitkisel planktonlar (fitoplanton), güneş ışığını ve ortamdaki besin tuzlarını kullanarak inorganik karbonu organik karbona dönüştürebilme (fotosentez yapabilme) olanağı sağlayan pigmentlere (klorofil gibi) sahiptirler. Uydular üzerine yerleştirilmiş olan sensörler, pigmentlerin güneş ışınlarının elektromanyetik spektrumun görünür (vis) bölgesinde bazı dalga boylarındaki ışınları soğurup diğerlerini ise saçarak neden oldukları renk değişimini kayıt ederek ortamdaki klorofil ve dolayısı ile birincil üretimin dağılımı ve miktarı hakkında bilgi üretebilmektedir. Akdeniz gibi organik madde açısından fakir ve dolayısı ile klorofil derişimi düşük ortamlarda denizin rengi koyu mavi, Karadeniz gibi organik madde üretimi yüksek ötrofik denizlerde ise yüksek klorofil derişimi nedeni ile

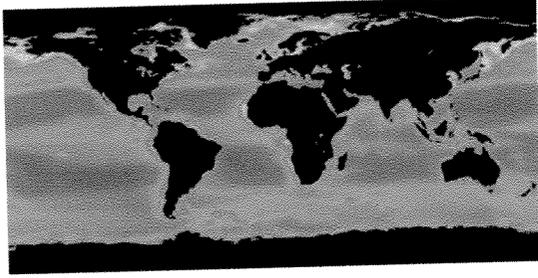
yeşildir. Bu renk değişimi klorofil ve karetonoid pigmentlerinin mavi dalga boyundaki (445 nm) ışınları, yeşil-sarı renkleri veren dalga boylarına (550-580 nm) göre daha fazla soğurmasından kaynaklanmaktadır (IOCCG, 1998; 1999).

Uydular üzerindeki sensörler bu dalga boylarındaki soğurma yerine yansımayı kayıt etme özelliğine sahiptirler. Bu nedenle uzaktan algılama kayıtları kullanarak klorofil miktarını ve dağılımını belirlemek için bu iki farklı (mavi-yeşil/sarı) dalga boylarındaki güneş ışımalarının uzaya yansıyan miktarlarının oranları kullanılmaktadır. Güneş ışımalarının deniz yüzeyine çarpıp yansıyan miktarlarının yerine oranlarının kullanılması, yansıyan ışımaların mutlak değerlerindeki değişkenlikleri ve belirsizlikleri ortadan kaldırarak ortamdaki renk değişimi hakkında daha sağlıklı bilgi türetilmesine olanak vermektedir.

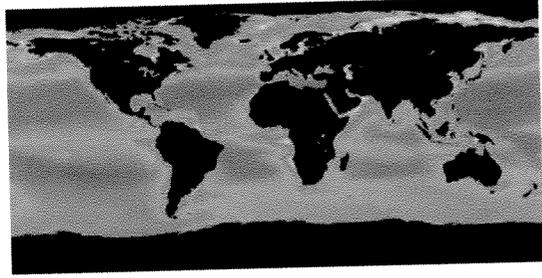
Şekil 1.1’de SeaWIFS verilerinin işlenmesi sonucu elde edilen mevsimsel klorofil derişimi dağılımları küresel ölçekte gösterilmiştir. SeaWIFS verilerinin klorofil bilgilerine dönüştürülmesine olanak sağlayan algoritmalar açık deniz ve okyanus şartları için geliştirilmiş olup kıyasal bölgeler ve iç denizler için gerçekçi sonuçlar üretememektedir. Bu tür bölgeler için algoritmaların yörelerin biyo-optik özelliklere uygun olarak optimize edilmesi gerekmektedir (O’Reilly ve diğ., 1998;).

Klorofil derişimlerinin küresel ölçekteki dağılımının saptanması atmosferik karbondioksitin kullanımına ve değişimine ait bilgiler elde edilebilmesine olanak sağlamaktadır. Yerkürenin % 75’ini kaplayan denizlerde yaşayan canlıların atmosferden karbondioksiti alarak organik karbona çevirmelerini rakamlarla ifade ederek bu miktarların yıllar arası değişiminin nedenini anlamak en önemli güncel araştırma konularından birisidir. Deniz rengini kayıt eden sensörler tarafından elde edilen klorofil dağılımına ait bilgiler bu yöndeki bilimsel araştırmalar için çok değerlidir. Deniz renginin uzaktan algılama metodu ile belirlenmesinin bir diğer uygulama alanı ise kıyı bölgelerinin sürdürülebilir sağlıklı yönetimi (özellikle balık stoklarının yönetimi) ile ilgili araştırmalardır. Günümüzde balıkçılık ile ilgili en önemli sorunlardan birisi aşırı avlanma, küresel ısınmanın ekolojik etkileri gibi nedenlerle balık stoklarındaki değişim ve bazı türlerin stoklarının tükenmesidir. Bu sorunun çözümüne yönelik ekosistem davranışlarındaki değişim ve bu değişimin geniş ölçekli sirkülasyon dinamiği ve iklim değişimi ile bağlantısının anlaşılması gibi konularda gerçekleştirilecek

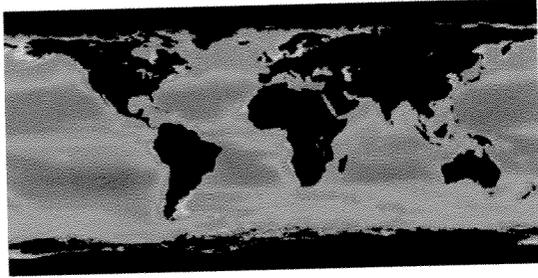
araştırmalarda deniz rengini kayıt edebilme özelliğine sahip sensörlerden elde edilen veriler kritik öneme sahiptir.



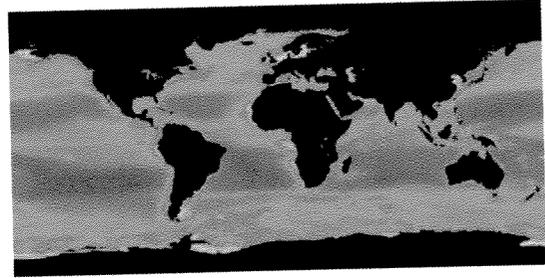
İlkbahar (1998-2002)



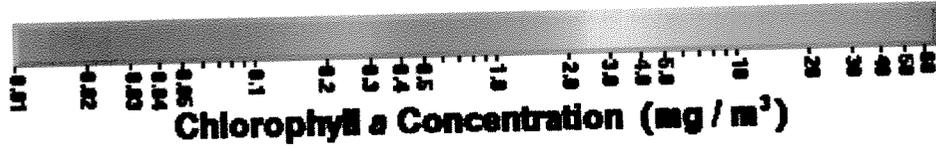
Yaz (1998-2001)



Sonbahar (1998-2001)



Kış (1997-2002)



Şekil 1.1. SeaWIFS sensöründen elde edilen verilerden türetilen mevsimsel klorofil derişiminin küresel ölçekte gösterilmesi
http://seawifs.gsfc.nasa.gov/cgi/monthly_climatologies.pl

Özetle, uzaktan algılama yöntemi ile elde edilen okyanus rengi (ocean color) verileri, denizsel ortamda yaşayan fitoplantonların mevsimsel ve bölgesel izlenebilmesi için yegane pratik metod olup bu yöntem ile elde edilen bilgiler okyanuslardaki birincil üretim, küresel biyojeokimyasal döngüler (karbon ve besin tuzları) ve balıkçılık alanında gerçekleştirilen bilimsel araştırmalar için son derece gereklidir.

Uyduların üzerine yerleştirilmiş olan sensörler, yeryüzüne çarpıp geri yansıyan güneş ışınlarını ve ısınan yeryüzünün kızıl ötesi dalga boylarında yaptığı ışınların şiddetini

elektromanyetik spektrumun farklı dalga boylarında kayıt edebilme özelliğine sahiptirler. Ancak, güneşten yeryüzüne gelen ve/veya yeryüzünden uzaya geri dönen güneş ışınlarının önemli bir bölümü atmosferden geçerken atmosferin moleküler (gaz) ve/veya parçacık (aerosol) bileşenlerinin güneş ışınlarını saçabilme (scattering) ve/veya soğurabilme (absorption) özellikleri nedeni ile azalmakta veya saçılmaktadır. Bu durum, uzaktan algılama verilerinin yer yüzünün özelliklerini gösteren bilgiye (örn. denizlerdeki klorofil dağılımı ve miktarı) dönüştürülmesinde sorun yaratmaktadır. Bu yüzden uydular üzerine yerleştirilmiş sensörlerin kayıt ettiği uzaktan algılama verileri, öncelikli olarak atmosfer etkisinin temizlenmesi (atmospheric correction) olarak tanımlayabileceğimiz işlemlere tabi tutulmaktadır (IOCCG, 1998; 1999).

Bu amaçla atmosferin optik özellikleri tanımlanarak atmosferik temizleme algoritmaları geliştirilmiştir. Atmosfer etkilerinin bazılarının tanımlanması ve dolayısı ile uygun algoritmalar kullanılarak uydu seviyesinde ölçülen ışınlar üzerindeki katkılarının düzeltilme yöntemi çok açık olup bir sorun teşkil etmemektedir. Buna örnek olarak güneş ışınlarının atmosferden geçişi sırasında atmosferin moleküler bileşenlerinin neden olduğu saçılma (rayleigh scattering) verilebilir. Bu saçılmanın miktarı, atmosferin moleküler bileşenlerinin atmosferde homojen olarak dağılmış olmasının sağladığı kolaylık ile yeryüzü basıncı ve güneşin ışınma sabiti verileri kullanılarak teorik yöntemlerle doğru bir şekilde hesaplanabilmekte ve uydu seviyesinde kayıt edilen toplam ışın miktarından çıkarılmaktadır. Öte yandan atmosferdeki ince tanecik boyutlu parçacıkların (aerosoller) nicel ve nitel özellikleri zaman ve uzay ölçeğinde çok büyük değişkenlik gösterdiği için güneş ışınlarının atmosferden geçişi sırasında aerosollerin neden olduğu saçılma (Mie scattering) miktarlarının tesbit edilmesi özel bir problem teşkil etmektedir. Deniz yüzeyi renk değişimini kayıt etme özelliğine sahip sensörlerin verilerinden aerosollerin optik özelliklerine ait bilgilerin de türetilmesi sayesinde, uydu seviyesinde ölçülen toplam ışın miktarı üzerindeki aerosollerin katkıları tanımlanabilir ve uygun algoritmalar yardımı ile bu katkı temizlenebilmektedir (Schwindling ve diğ., 1998).

SeaWIFS sensörünün dizayn edilmesindeki başlıca amaç rutin olarak okyanus renginin kayıt edilmesi ve elde edilen bulguların okyanusların biyo-optik özelliklerini betimleyen bilgiye dönüştürülmesi idi. Ancak, yukarıda da belirtildiği üzere, uydu seviyesinde elektromanyetik spektrumun farklı dalga boylarında kayıt edilen ışın miktarlarını okyanuslar ile ilgili bilgiye

dönüştürebilmek için atmosfer etkisinin temizlenmesi gerekmektedir. Bu temizleme işlemi atmosferin tepesinde bulunan sensörün, elektromanyetik spektrumun görünür (vis) dalga boylarında kayıt ettiği toplam ışımaya miktarından atmosfer katkısını çıkararak sadece okyanus yüzeyindeki bilgiye ait olan ışımaya miktarını hesaplamaktadır.

SeaWIFS uydusu verilerine uygulanan atmosferik temizleme algoritması, kızıl ötesine yakın (NIR) iki ayrı spektral kanal (765 nm ve 865 nm) tarafından kayıt edilen ışımaya miktarlarını kullanarak aerosollerin optik özelliklerini hesaplamaktadır (Gordon ve Wang, 1994).

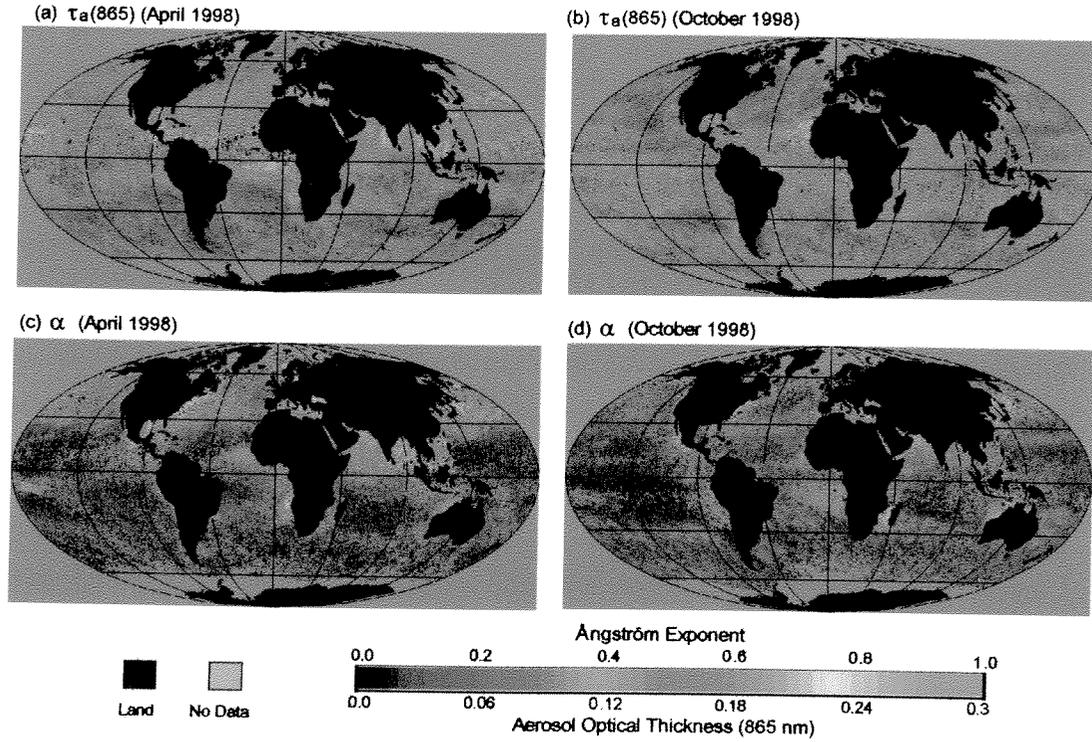
Aerosollerin 865 nm dalga boyundaki optik kalınlıkları (Aerosol Optical Thickness, τ) rutin olarak okyanusların üzerindeki atmosfer için hesaplanmakta ve kullanıcıya sunulmaktadır.

Aerosollerin atmosfer kolonundaki (yer seviyesinden atmosferin tepesine kadar) derişimi ile orantılı olan aerosollerin optik kalınlığı, güneş ışınlarının atmosfer kolonunda bulunan aerosoller tarafından saçılmasının (scattering) ve soğurulmasının (absorption) ölçüsüdür.

Angstrom katsayısı (Angstrom exponent, α) ise aerosollerin optik kalınlığının spektral değişimine bağlı olup aerosollerin parçacık boyutu dağılımı ile ilgili bilgi verir. Şekil 1.2'de bu her iki parametrenin okyanuslar üzerindeki dağılımı gösterilmektedir. Aerosollerin optik kalınlığı SeaWIFS sensörünün 865 nm dalga boyunda kayıt edilen bulgulardan, Angstrom katsayısı ise aynı sensörün 765 nm ve 865 nm dalga boylarında kayıt edilen bulgulardan türetilmiştir.

SeaWIFS verilerine uygulanan atmosferik temizleme algoritması, denizlerin üzerindeki atmosferde yoğun miktarda güneş ışınlarını soğurabilme özelliği olan aerosol bulutu olduğu durumlarda, uydu seviyesinde kayıt edilen toplam ışımaya miktarı üzerindeki atmosfer katkısını gerçekçi olarak tanımlayamamaktadır. Bu durum ise sadece deniz yüzeyine ait olan ışımaya miktarının türetilmesine engel olmaktadır. SeaWIFS verilerinin proses işlemleri okyanusların renginin türetilmesi (örn. klorofil derişimi) amacı ile optimize edildiği için böylesi durumlara maruz kalan bölgelerin verileri iptal edilerek buralarda okyanusların biyo-optik özellikleri türetilmemektedir. Şekil 1.2a ve b'de görüldüğü üzere Afrika kıtasının kuzey ve güneyinde, Atlantik Okyanusuna taşınan yoğun çöl tozu ve biyokütle yanması sonucunda oluşan duman bulutları uydu seviyesinde çok yüksek optik kalınlık oluşturmuş ve bu bölgelerin altında kalan okyanus parçasının biyo-optik özelliğinin türetilmesine engel olmuştur. Bu nedenle bu bölgeler maskelenmiş (gri renk ile) ve SeaWIFS'in kullanıcıya sunmuş olduğu veri seti içinde iptal edilmiştir. Buna benzer toz ve duman bulutlarının uydu seviyesinde tanımlanıp optik

özelliklerinin türetilmesi ancak kullanıcıya açık olan SeaWIFS'in verilerini işleyen standart algoritmalar üzerinde değişiklik yapılması ile mümkündür (Wang ve diğ., 2000).



Şekil 1.2. SeaWIFS verileri ile türetilmiş olan aerosollerin optik özelliklerinin küresel dağılımı. (a) ve (b) Nisan ve Ekim 1998 ayları için aerosollerin optik kalınlığı (τ); (c) ve (d) Nisan ve Ekim 1998 ayları için Angstrom katsayısı (α). (Wang ve diğ. (2000) den alınmıştır).

Atmosfer yolu ile karalardan denizlerin üzerine taşınan çöl tozu (mineral toz) ve biyokütle yanmasından açığa çıkan duman bulutları SeaWIFS'in standart atmosferik temizleme algoritmaları ile tanımlanamamaktadır. Atmosferik temizleme işlemi gerçekleştirilemediğinden bu bölgelerin denizsel biyo-optik özellikleride üretilememektedir. Bu tip bulutları oluşturan aerosoller, elektromanyetik spektrumun görünür dalga boyundaki ışınları yüksek miktarlarda soğurma özelliğine sahiptirler. Oysa ki SeaWIFS'in standart algoritması sadece soğurma yapmayan ve/veya çok az yapan aerosoller için dizayn edilmiştir. Elektromanyetik spektrumun görünür bölgesindeki ışınları soğurma özelliğine sahip aerosollerin ve bu tip aerosol bulutlarının altında kalan denizlerin optik özelliklerinin türetilmesi için uygun bir atmosferik temizleme algoritması geliştirilmiş ve algoritmanın SeaWIFS sensörü verileri için elverişli olduğu gösterilmiştir (Gordon ve diğ., 1997). Bu algoritma ile Şekil 1.2a'da görülen Kuzey Afrika'dan Atlantik Okyanusu üzerine taşınan

mineral toz bulutuna ait (Şekil’de sunulan aerosollerin optik kalınlığı SeaWIFS’in standart algoritması kullanılarak türetildiği için bu bölge maskelenmiştir) optik özelliklerin yanısıra bulutun altında kalan denizsel bölgeye ait biyo-optik özelliklerin de başarılı bir biçimde türetildiği Moulin ve diğ. (2001a, b) tarafından kanıtlanmıştır.

Şekil 1.2’de aerosollerin okyanuslar üzerindeki optik kalınlığının ve parçacık boyutunun mevsimsel ve bölgesel değişimleri açıkça görülmektedir. Okyanus atmosferlerinin karalardan uzak bölgelerindeki aerosoller düşük optik kalınlığa ve büyük parçacık boyutuna (düşük α değerlerine) sahiptirler. Bu durum açık deniz atmosferinin tipik özelliğidir. Oysaki karaların kıyısındaki okyanus parçalarının ve/veya karalarla çevrili iç denizlerin atmosferinde aerosollerin optik kalınlığı daha yüksek olup aerosollerin tanecik boyutları ise daha düşüktür (yüksek α değerlerine sahiptirler).

Küresel ölçekte iklim ve biyojeokimyasal döngüler üzerinde etkin rol oynaması nedeni (Charlson ve diğ., 1987; 1992) ile aerosollerin optik kalınlığının uzaktan algılama metodu ile belirlenmesi yönünde önemli çalışmalar gerçekleştirilmiştir (Husar ve diğ., 1997; Herman ve diğ., 1997; Stegmann ve Tindale, 1999). Fitoplanktonların metabolik prosesleri esnasında ürettiği dimetilsülfid (DMS) gazının atmosferdeki fotokimyasal süreçlerle bulut oluşturan sülfat çekirdeğine dönüşerek bulut miktarını artırması sonucunda iklim üzerinde rol oynama potansiyeli olduğunun ileri sürülmesi ile aerosol ve denizlerdeki üretim araştırmalarının birlikte yürütülmesinin gereği ortaya çıkmıştır (Charlson ve diğ., 1987).

Önceki yıllarda, deniz ortamındaki besin tuzlarının (nitrat ve fosfat) ve bazı eser elementlerin (Fe gibi) bütçesi yapılırken sadece nehirler tarafından ulaşan girdiler göz önüne alınmakta ve atmosfer yoluyla olan girdiler göz ardı edilmekte idi. Ancak son on yıl içerisinde gerçekleştirilen araştırmaların sonuçları, özellikle kıydan uzak bölgeler ile nehir girdileri açısından fakir olan deniz ortamları için atmosfer girdilerinin en önemli kaynak olduğunu göstermiştir (Duce ve diğ., 1991; Jickells, 1995; 1999).

Pasifik Okyanusunun Ekvator kuşağındaki bölgesi gibi besin tuzu açısından oldukça zengin fakat birincil üretim açısından fakir olan HNLC (High-Nutrient Low Chlorophyll) bölgelerde birincil üretimin, demir (Fe) eksikliği nedeni ile düşük olduğu ileri sürülmüş ve bu bölgeye yapay olarak Fe verilince üretimin arttığı gözlenmiştir (Coale ve diğ., 1995; Hutchins ve

Bruland, 1998). Demirin deniz ortamı için doğal kaynağının çöl bölgelerinden atmosfer yoluyla taşınarak okyanuslara ulaşan mineral toz olduğu ve demir açısından zenginleşmiş olan bu tozların denizsel birincil üretime katkıda bulunduğu gösterilmiştir (Young ve diğ., 1991; Fung ve diğ., 2000; Gabric ve diğ., 2002).

Okyanus rengini kayıt etme yeteneğine sahip sensörlerin kayıt ettiği veriler, hem atmosferdeki aerosollerin ve hemde okyanusların birincil üretiminin indikatörü olan klorofilin dağılımını ve miktarını veren bilgiye dönüştürülebilmektedir. Dolayısı ile bu sensörlerden elde edilebilen bilgiler, atmosfer ile denizler üzerine ulaşan mineral tozun denizsel birincil üretim üzerinde var olduğu düşünülen potansiyel etkilerin araştırılması için çok elverişli bir araçtır (Stegmann ve Tindale, 1999; Stegmann, 2000; Gao ve diğ., 2001; Gabric ve diğ., 2002).

1.2. Akdeniz ve Uzaktan Algılama (Deniz Rengini Kayıt Eden Sensörler)

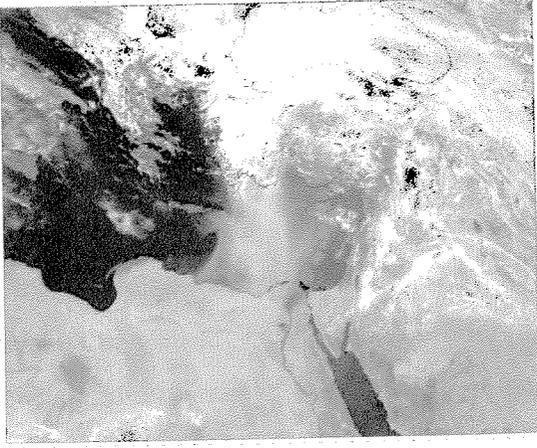
1.2.1. Akdeniz'in Genel Özellikleri

Yarı kapalı bir deniz olan Akdeniz'in Cebelitarık Boğazı ile Atlantik Okyanusu'na, Süveyş Kanalı ile Kızıl Deniz'e ve İstanbul Boğazı ile Karadeniz'e bağlantısı vardır. Dar bir boğaz olan Cebelitarık Boğazı Akdeniz'in Atlantik Okyanusu ile olan bağlantısını kısıtlayarak, Akdeniz'in sirkülasyonu ve birincil üretimi üzerinde önemli rol oynamaktadır. Akdeniz baseninin birincil üretimi batıdan doğuya doğru azalan bir eğilim göstermektedir (Batı Akdeniz'in yüzey sularındaki klorofil miktarı ve yıllık birincil üretimi Doğu Akdeniz'in yaklaşık iki katıdır). Doğu Akdeniz ihtiva ettiği besin tuzlarının miktarı açısından denizlerin çölü olarak tanımlanmakta ve sadece kıyısız alanlarda yöresel ve mevsimsel olarak yüksek klorofil değerleri görülmektedir (bkz. Şekil 1.3c). Cebelitarık Boğazından Akdeniz'e olan besin tuzları girdisi bunların Atlantik Okyanusunda bulunan canlılar tarafından daha önce kullanılması nedeni ile oldukça düşük seviyededir. Bu besin tuzlarının bir kısmında Atlantik suyu Batı Akdeniz'den geçerken canlılar tarafından tüketilmesi sonucu doğu basenine ulaşan Atlantik suyunun besin tuzu katkısı bulunmamaktadır. Ayrıca batıdan doğuya geçişi sırasında iklimsel faktörlerin etkisi ile buharlaşmaya maruz kalan Atlantik suyunun doğu basenine ulaştığında tuzluluk miktarı %10 oranında artmaktadır. Yoğunluğu artan Atlantik suyu doğu baseninde kış mevsimindeki soğuklar ile meydana gelen konvektif karışım olaylarına bağlı

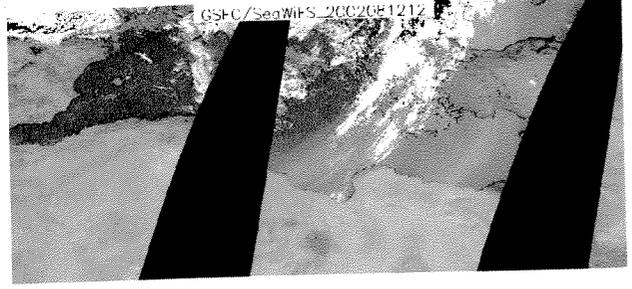
olarak dip sulara batmakta ve batıya doğru taşınarak Cebelitarık Boğazından Akdeniz'i terk etmektedir (Turley, 1999; Antoine ve diğ., 1995).

Kuzey-güney kesiti içerisindeki sosyo-ekonomik farklılaşma, küresel iklim değişimi ve bunun sonucu olarak ortaya çıkan deniz seviyesi artışı gibi faktörler Akdeniz'in ekosistemini ve bu ekosistemin korunmasına yönelik yönetim planlarını tehdit eder niteliktedir. Buna ek olarak bu bölge iklim, jeomorfoloji, bitki örtüsü ve karaların kullanımını açısından kuzey ve güney bölümleri arasında farklılaşma göstermektedir. Bu durum Şekil 1.3d'de sunulan SeaWIFS görüntüsünden açıkça görülmektedir. Akdeniz'in güney ve doğu kıyıları çöllerle (sarı bölgeler) kuzeyi ise daha üretken karalar ile (yeşil bölgeler) çevrilidir.

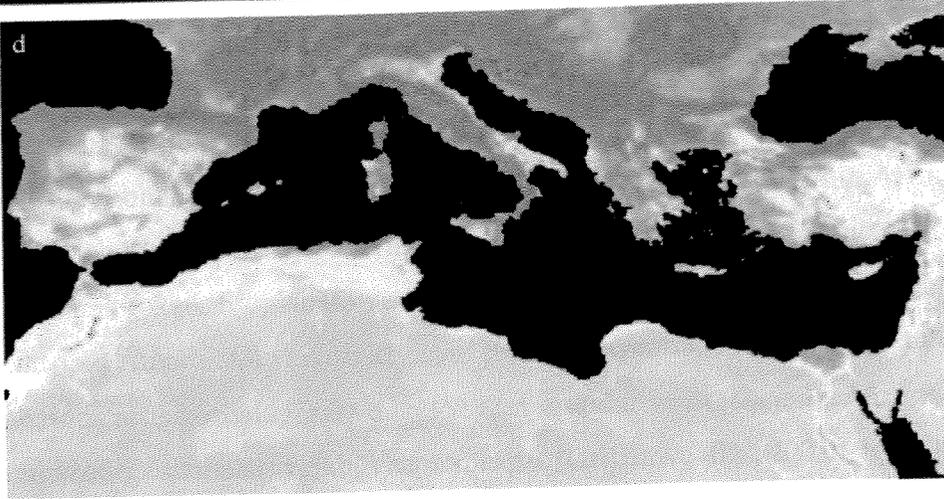
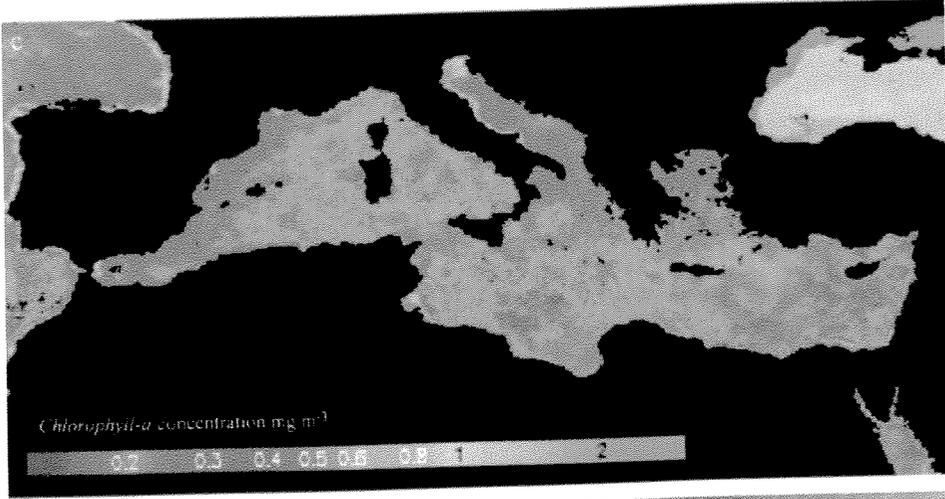
Atmosfer yolu ile Akdeniz üzerine taşınan çöl tozları SeaWIFS verilerinden türetilen gerçek renk (true color) görüntülerinde tanımlanabilmektedir (bkz. Şekil 1.3a, b). Çöl tozu sarı bulut halinde (Mısırdan kaynaklanan ve Şekil 1.3a'da verilen durum) veya tüm baseni kaplayan sarımsı bir örtü (Libya'dan kaynaklanarak tüm doğu basenini saran ve Şekil 1.3b'de verilen durum) şeklinde Doğu Akdeniz üzerinde yayılmaktadır. Çöl bölgelerinden Akdeniz üzerine taşınan tozların bu denizin ekosistemine besin tuzlarınca katkıda bulunma potansiyeli olduğu bilimsel araştırmalar ile gösterilmiştir (Bergametti ve diğ., 1992; Guieu ve diğ., 2002a,b; Herut ve diğ., 2002; Özsoy ve Saydam, 2001; Ridame ve Guieu, 2002; Saydam ve Şenyuva, 2002; Sarthou ve Jeandel, 2001; Migon ve Sandroni, 1999). Atmosferik taşınım ile Doğu Akdeniz'e darbeler halinde ulaşan ve deniz üzerine çöken çöl tozlarının miktarı oldukça yüksektir. 1992 yılında Doğu Akdeniz kıyısında gerçekleştirilen kesintisiz çöl tozu ölçümleri, Mayıs ayında gözlenen iki olay süresince deniz yüzeyine çöken toz miktarının yıl süresince çöken toplam toz miktarının %30'unu oluşturduğu göstermiştir (Kubilay ve diğ., 2000). Tek bir olayla deniz yüzeyine çökelen yüksek miktardaki çöl tozlarının ortamdaki besin tuzlarının miktarını arttırarak klorofil derişiminde ani yükselmeye neden olduğu Akdeniz'in doğu ve batı basenlerinde gözlenmiştir (Barak ve diğ., 1999, 2002; Ridame ve Guieu, 2002). Bu tozların Akdeniz üzerine taşınması sürekli bir durum olmayıp episodik karakter taşımakta ve etki alanı oldukça geniş olmaktadır. Dolayısı ile bu olayları yer seviyesinde gerçekleştirilen ölçümlerle tanımlamak ve etki alanlarını belirlemek için kesintisiz ve geniş uzay ölçekli gözlem istasyonları gerekmektedir. Böylesi bir gözlem istasyonunun kurulması pratik değildir. Ancak uzaktan algılama verileri ile bu olayların araştırılması mümkündür.



(a) 18 Nisan 2001



(b) 12 Ağustos 2002



Şekil 1.3. Çöl tozunun Akdeniz üzerine taşınımını gösteren SeaWIFS görüntüleri

(a) ve (b) <http://visibleearth.nasa.gov/cgi-bin/results>

SeaWIFS verilerinden türetilen klorofil dağılımı (Eylül 1997) (c) (Turley, 1999)

SeaWIFS verilerinden türetilen bitki örtüsü dağılımı (Eylül 1997) (d) (Turley, 1999)

Endüstriyel devrimden günümüze uzanan dönemde çevresel bozulmalar olduğu artık kanıtlanmış bir olgudur. Günümüzde açık denizlerde zaman ve mekan ölçeğinde gözlenen değişimlerin sistemin doğal yapısından ve/veya sistemi dışardan etkileyen doğal mekanizmalardan kaynaklandığı ve antropojenik aktivitelerin henüz açık deniz üzerinde tahribata yol açmadığı düşünülmektedir. Karasal kaynaklı etkiler sonucunda ileride oluşabilecek bir tahribatın önceden ortaya çıkarılabilmesi, boyutlarının tahmin edilebilmesi ve tahribatın azaltılması yönünde tedbirler alınabilmesi ancak ve ancak sistemin doğal değişiminin iyi anlaşılması ve bunların karasal kaynaklı yapay etkiler sonucunda oluşabilecek değişimlerden ayırt edilebilmesi ile mümkündür. Örneğin besin tuzlarımca fakir olan Akdeniz basenine ($2.3 \cdot 10^6 \text{ km}^2$) atmosfer yolu ile yıllık 20-50 10^6 ton mineral toz taşınmaktadır (Guerzoni ve diğ., 1999). Bu oldukça yüksek miktarda doğal kaynaklı atmosfer girdisinin Akdeniz ekosistemi üzerinde olası etkisi üzerinde bir çok hipotez bulunmasına rağmen iyi planlanmış ve basen ölçeğinde bulgu ve bilgi üretmiş bilimsel bir çalışma yoktur. Böylesi bir araştırmanın tek bir noktadan yapılan yer ölçümleri ile gerçekleştirilmesi teknik açıdan imkansızdır. Uzaktan algılama yöntemi, basen ölçeğinde ve değişimi gözleyebilmeye elverişli zaman ölçeğinde bulgu toplamaya uygun olduğu için burada öngörülen araştırma projesinin kapsamında kullanılacaktır.

Afrika kıtasından taşınan çöl tozlarının deniz ekosistemi üzerinde tahribat oluşturabilme potansiyeli Saydam (1996) tarafından belirtilmiştir. Daha sonra, Afrika kıtası üzerinde atmosfere yayılan ve rüzgarlar ile Amerika kıtasının doğu kıyısına kadar ulaşan çöl tozlarının kıyusal ekosistem üzerindeki tahribatına yönelik bulgular da literatürde yer almıştır (Walsh ve Steidinger, 2001; Lenç ve diğ., 2001). Bu araştırmacılar, Amerika kıtasının Atlantik Okyanusu kıyısına ulaşan ve yağmurlarla deniz yüzeyine çöken çöl tozlarının ortamın demir miktarını arttırarak toksik fitoplankton patlamalarına neden olduğunu kanıtlamışlardır. Yine Amerika kıtasının Atlantik Okyanusu kıyısına çöl tozu taşınımının olduğu dönemlerde alerjik astım vakalarında artış görüldüğünü ve bu tozların insanlar ve diğer canlılar üzerinde patojen etkisi olan mikroorganizmaları taşıdığı saptanmıştır (Griffin ve diğ., 2001a, b; 2002; Shinn ve diğ., 2000).

Afrika kıtasından taşınan çöl tozlarının ekosistem ve iklim üzerindeki küresel boyutta yarattığı etkileri kanıtlayan bilimsel bulgular, uzaktan algılamanın bu tozlarla ilgili

araştırmalarda geniş uzay ve zaman ölçeklerinde veri toplamak için çok elverişli bir metod olduğu gerçeğini açıkca ortaya koymaktadır. .

1.2.2. Akdeniz’de Gerçekleştirilen Uzaktan Algılama Araştırmaları

Akdeniz baseninin uzaktan algılama metodu ile türetilen ilk pigment (klorofil) ve birincil üretim bilgisi, 8 sene (1979-1986) küresel ölçekte veri toplayan CZCS (Coastal Zone Color Scanner) bulguları kullanılarak Antoine ve diğ. (1995) gerçekleştirilmiştir. Daha sonra Gitelson ve diğ. (1996) güneydoğu Akdeniz’de bir seri klorofil ve optik ölçümler gerçekleştirerek CZCS sensörünün kayıt ettiği verilerden türetilen klorofil değerlerinin doğruluğunu test etmiş ve küresel algoritmaların bölgesel ölçekte gerçekçi sonuçlar türetemediğini göstermişlerdir.

1990’lı yıllarda aynı amaçla başka sensörler dizayn edilip uydular üzerine yerleştirilmiştir (örn. ocean color and temperature scanner [OCTS], polarization and directionality of earth reflectances [POLDER], sea-viewing wide field –of- view sensor [SeaWIFS]). OCTS ve POLDER sensörlerinin verileri Kasım 1996-Haziran 1997 arasına aittir. SeaWIFS sensörü ise Eylül 1997’den günümüze değin veri sağlamaktadır. Bricaud ve diğ. (2002) bu üç sensörün verilerinden türetilen klorofil ve yüzey suyu sıcaklığı bilgilerini kullanarak Akdeniz’in birincil üretim dağılımını ve zamana bağlı değişimini göstermişlerdir. Her üç sensörün verilerinden klorofil türetilmesi için küresel ölçek için tasarlanmış olan algoritmalar kullanılmıştır. Bu klorofil değerleri Akdeniz’de gerçekleştirilmiş olan bir seri klorofil ölçümleri ile karşılaştırılarak uzaktan algılama metodu ile türetilen değerlerin doğruluğu test edilmiştir. Bu karşılaştırma sonucunda uzaktan algılama yöntemi ile türetilen klorofil değerlerinin mevsimsel değişiminin yer ölçümleri ile uyumlu olduğu gösterilmiştir. Ancak özellikle düşük klorofil değerlerinin uzaktan algılama metodu ile gerçek değerinden 5 kata varan oranda daha fazla olarak türetildiği gösterilerek Akdeniz’e mahsus yöresel biyo-optik özellikleri taşıyan algoritmaların türetilmesinin gereği vurgulanmıştır.

D’Ortenzio ve diğ. (2002) tarafından gerçekleştirilen benzer bir çalışmada ise 1999-2000 yıllarında orta Akdeniz’de üç ayrı dönemde biyo-optik ölçümler gerçekleştirilmiştir. Elde edilen biyo-optik ölçümler daha sonra Akdeniz için daha gerçekçi bölgesel bir algoritma üretmek için kullanılmıştır.

Sonuç olarak bugüne kadar gerçekleştirilen araştırmaların sonuçları küresel algoritmaların kullanılması ile Akdeniz için gerçekçi klorofil değerleri üretmenin mümkün olmadığını göstermiştir. Araştırmalar Akdeniz'in kendine has biyo-optik özelliklerinin ve/veya Akdeniz atmosferinin optik özelliklerinin küresel ölçek için dizayn edilmiş klorofil ve atmosferik temizleme işlemlerini gerçekleştiren algoritmalar içerisinde yeterince tanımlanmamış olduğunu ortaya çıkarmıştır (Gitelson ve diğ., 1996; Bricaud ve diğ., 2002; D'Ortenzio ve diğ., 2002). Claustre ve diğ. (2002), Akdeniz'in okyanus rengini kayıt eden sensörler vasıtası ile türetilen klorofil derişimlerinin gerçek değerlerinden yüksek olmasının nedenini bölgeye Sahra çölünden taşınan ve deniz yüzeyine çöken mineral tozun Akdeniz'in optik karakteristiğini etkilemesine ve bu faktörün küresel algoritmalar içerisinde tanımlanmamış olmasına bağlamışlardır. Bu araştırmacılar Sahra çölünden taşınan mineral toza maruz kalan denizsel bölgeler için okyanus rengini kayıt eden sensörlerden klorofil türeten algoritmaların, bölgesel karakteristiğe uygun olarak dizayn edilmesinin önemini vurgulamışlardır. Aksi takdirde uzaktan algılama metodu ile türetilen klorofil derişiminin gerçek değerinden 2 kat daha fazla türetilmesinin bu veriler kullanılarak hesaplanan birincil üretim miktarının gerçek değerinden % 40 oranında daha fazla hesaplanmasına neden olacağı vurgulanmıştır. Bu durum okyanusların karbon döngüsü üzerindeki etkisinin gerçekçi rakamlarla belirlenebilmesini imkansız kılacaktır.

2. MATERYAL VE METOD

Bu araştırmada okyanus rengine ait verileri kayıt etme özelliğine sahip olan SeaWIFS (Sea-viewing Wide Field-of-view Sensor) sensörünün kullanıcıya açık olan internet adresinden (<http://daac.gsfc.nasa.gov/>) temin edilen verileri kullanılmıştır. Bu ham verilerin işlenerek bilgiye dönüştürülmesi ise NASA tarafından geliştirilen SeaDAS (SeaWIFS Data Analysis System) paket programı ile gerçekleştirilmiştir.

TÜBİTAK tarafından bu proje kapsamında sağlanan bütçe ile verilerin işlenebilmesi ve algoritmaların yazıldığı programları SeaDAS içinde çalışır duruma getirebilmek için bir adet kişisel bilgisayar ile derleyici bir program satın alınmıştır. Bilgisayara UNIX işletim sistemi yüklenerek SeaDAS programı çalışır hale getirilmiştir. Bu paket program içerisinde

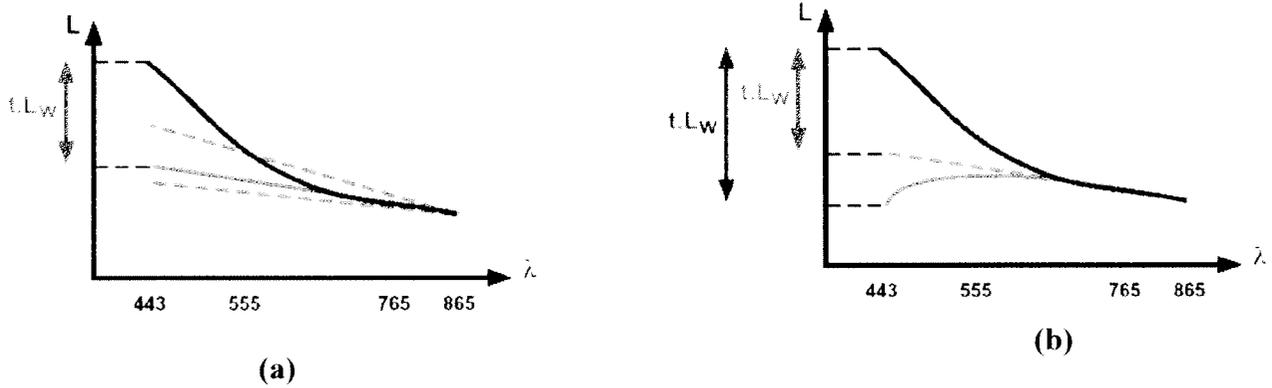
SeaWIFS'in ham verilerinden atmosferik (aerosollerin optik kalınlığı ve angstrom katsayısı gibi) ve denizsel (klorofil ve kokolit türü fitoplanktonların patlamasının tanımlanması gibi) bilgileri türetebilen küresel ölçek için dizayn edilmiş olan algoritmalar (standart algoritma) kullanıma hazır olarak bulunmaktadır.

SeaWIFS algılayıcısı güneş ışınlarının yeryüzüne ulaşmış ve geri yansıyan ışın miktarını sekiz ayrı spektral bant aralığında (412, 443, 490, 510, 555, 670, 765 ve 865 nm) kayıt etmektedir. SeaWIFS gibi uydular üzerine yerleştirilmiş okyanus rengini kayıt etme özelliğine sahip olan sensörlerin verileri genel olarak iki aşamada işlenerek bilgiye (deniz yüzeyinde yaşayan bitkisel planktonların izsürücü pigmenti olan klorofil bilgisi gibi) dönüştürülebilmektedir.

İlk aşamada atmosferik temizleme algoritması kullanılarak sensörün kayıt ettiği toplam ışın miktarından (L) atmosfer katkısı çıkarılmakta ve sadece deniz yüzeyi bilgisine sahip olan ışın miktarı (L_w) elde edilmektedir. Okyanusların yüzeyine ulaşan güneş ışınları eğer uydudan uyduların seviyesi arasında atmosfer olmasa idi, yüzeyin biyo-optik özelliklerine (fitoplankton miktarı ve türü, askıda madde miktarı ve çözölmüş organik madde gibi) bağılı olarak ya tamamen geri uzaya yansıtılacak veya bir kısmı soğurulduktan (fotosentetik pigmentlerin mavi dalga boylarında soğurma yapmaları) sonra kalan kısmı uzaya geri yansıtılacaktı. Fakat gerçek hayatta deniz yüzeyine ulaşan ve yüzeyden yansıyan güneş ışınları uydudan uydular arasında bulunan atmosferin içerisinde iki kez geçerek atmosferin tepesinde (Top Of the Atmosphere, TOA) bulunan uydular üzerine yerleştirilmiş sensörlere ulaşmaktadır. Bu nedenle elektromanyetik spektrumun görünür (vis) bölgesindeki dalga boylarında kayıt edilen toplam ışın miktarının ancak % 10'u deniz yüzeyi ile ilgili bilgiye sahip iken geriye kalan % 90'lık kısmı atmosfer katkısından kaynaklanmaktadır. Dolayısıyla okyanus rengini algılayan sensörlerin verilerinden deniz yüzeyine ait bilgilerin gerçekçi olarak türetilmesinin ön koşulu atmosfer katkısının hassas metodlarla temizlenmiş olmasıdır.

Şekil 2.1a'da uydudan uydular seviyesinde algılanan toplam ışın miktarı (siyah renkte gösterilen eğri) ve sadece aerosollerden kaynaklanan ışın miktarı (kırmızı renk ile gösterilen eğri) dalga boyunun fonksiyonu olarak şematik bir biçimde gösterilmiştir. Algılayıcı farklı dalga boylarındaki toplam ışın miktarlarını kayıt etmektedir. Atmosfer katkısı bu toplam ışın miktarı içerisinde olduğu için atmosfer katkısının teorik metodlarla hesaplanarak toplam ışın miktarından çıkarılması gerekmektedir. Atmosferin moleküler bileşenlerinden kaynaklanan

katkısının teorik metodlarla doğru bir şekilde hesaplanması mümkün iken aerosol bileşenlerinden kaynaklanan katkısının hesaplanması oldukça sorunlu olup hesaplanması bir takım belirsizliklere maruzdur. Ayrıca atmosferin aerosol bileşenlerinin nitel ve nicel özellikleri zaman ve mekan ölçeklerinde çok değişken olduğu için Şekil 2.1a'da kırmızı renk ile gösterilen aerosollerden kaynaklanan atmosfer katkısı kesik çizgilerle verilen aralık arasında değişebilmektedir.



Şekil 2.1. Uydu seviyesinde kayıt edilen ışınma miktarının elektromanyetik spektrumun farklı dalga boylarındaki dağılımı. (a) atmosferde sadece ışınları saçma özelliği bulunan aerosollerin olduğu durum. (b) atmosferde bulunan aerosollerin ışınları saçmanın yanısıra mavi-yaşıl dalga boylarında soğurma yaptığı durum.

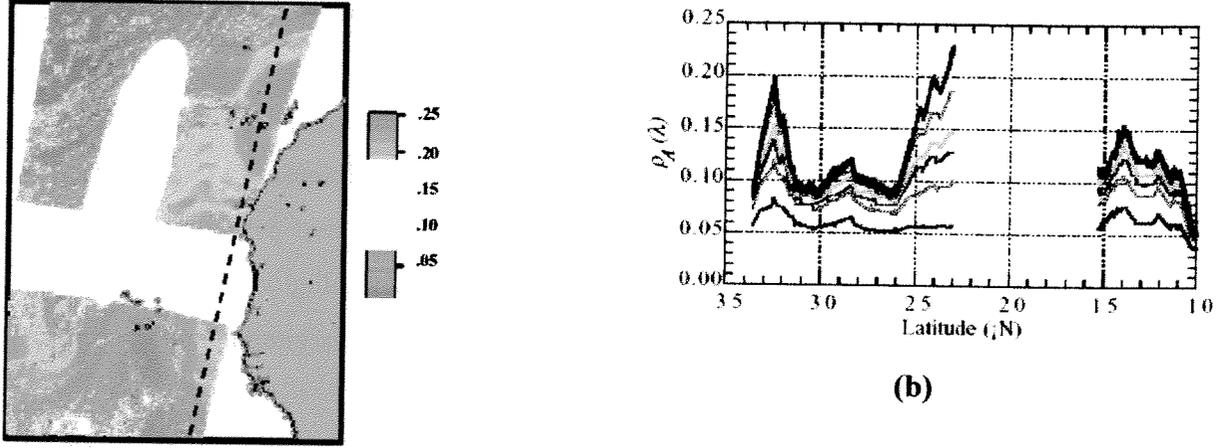
Elektromanyetik spektrumun kızıl ötesine yakın (NIR) dalga boylarında (765 ve 865 nm) deniz suyu güneş ışınlarını tamamen soğurduğu için uydu seviyesinde ölçülen toplam ışınma miktarı sadece atmosferden kaynaklanmaktadır (bknz. Şekil 2.1a). SeaWIFS'in standart atmosferik algoritması bu bilgi üzerine kurulmuş olup Gordon ve Wang (1994) tarafından geliştirilmiştir. Bu algoritma ile NIR dalga boylarında uydu seviyesinde kayıt edilen toplam ışınma miktarının tamamen atmosferden kaynaklandığı kabul edilerek (yani $L_w=0$) aerosollerin optik özellikleri saptanır. Daha sonra NIR dalga boyunda saptanmış olan bu özellikler kullanılarak aerosollerin elektromanyetik spektrumun görünür (visible, vis) dalga boylarındaki optik özellikleri tahmin edilir. Ve bu optik özellikler kullanılarak aerosollerden kaynaklanan ışınma miktarı hesaplanıp toplam ışınma miktarından çıkarılarak deniz yüzeyi bilgisine sahip olan ışınma miktarı bulunmaktadır. Bu hesaplamalar yapılırken atmosferde baskın olarak bulunan aerosollerin elektromanyetik spektrumun görünür dalga boylarında soğurma yapmayan veya çok az yapan türler olduğu kabul edilmektedir. Çünkü vis dalga boylarında soğurma yapma özelliğine sahip aerosol türlerinin optik özelliklerinin NIR dalga

boylarında tanımlanması mümkün değildir. Şekil 2.1b’de vis dalga boylarında soğurma yapma kabiliyeti olan aerosollerden kaynaklanan ışınım miktarının dalga boyunun fonksiyonu olarak değişimi şematik olarak gösterilmiştir. Görüleceği üzere soğurma yapmayan aerosollerden kaynaklanan ışınım miktarı (kesik kırmızı çizgi ile gösterilmiş olan) NIR dalga boylarından vis dalga boylarına doğru linear olarak artmaktadır. Öte yandan vis dalga boylarında soğurma yapma özelliği olan aerosollerden kaynaklanan ışınım miktarının (düz kırmızı çizgi ile gösterilmiş olan) benzer bir trend göstermeyip, vis dalga boylarında azaldığı görülmektedir. Dolayısı ile NIR dalga boylarında tanımlanmış olan aerosollerin optik özelliklerini kullanarak vis dalga boylarındaki optik özelliklerinin tahmin edilmesi sorun oluşturmaktadır. Atmosferinde bu özelliği gösteren aerosol türlerinin baskın olduğu durumlarda Gordon ve Wang (1994) tarafından geliştirilmiş olan algoritmanın deniz yüzeyinden kaynaklanan ışınım miktarını (L_w) gerçek değerinden (L_w) daha az hesaplamasına neden olmaktadır.

SeaWiFS verilerinin bilgiye dönüştürülmesinin ikinci aşamasında ise birinci aşamada elde edilen L_w değerleri kullanılarak O’Reilly ve diğ. (1998) tarafından geliştirilen biyo-optik algoritmaları ile deniz yüzeyine ait klorofil değerleri hesaplanmaktadır. Bu algoritmanın temeli dört ayrı (443, 490, 510, 555 nm) dalga boyu için hesaplanan L_w miktarlarının oranları ile klorofil derişimi arasındaki amprik bir formüle dayanmaktadır. Ancak bu şekilde türetilen klorofil değerleri atmosferde soğurma kabiliyeti olmayan aerosol türleri olduğu zaman gerçekçi olmaktadır. Aksi şartlarda aerosollerden kaynaklanan soğurma denizde yaşayan fitoplanktonlarca gerçekleştirilmiş gibi hesaplandığı için gerçek değerinden daha yüksek klorofil derişimleri hesaplanmaktadır.

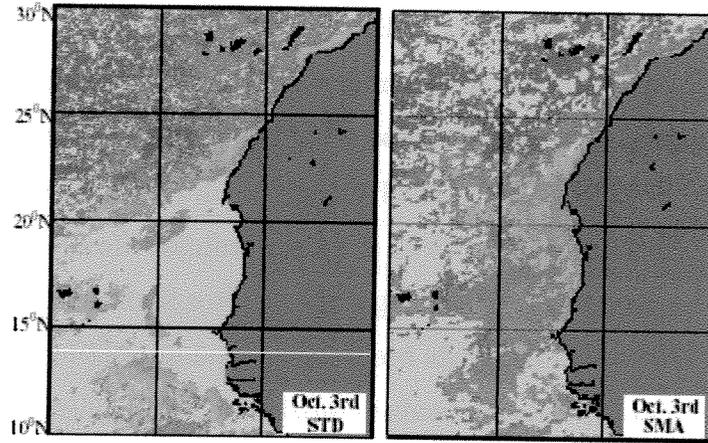
Afrika’dan kaynaklanan çöl tozlarına maruz kalan Atlantik okyanusunda SeaWiFS’in standart algoritmalarının başarısız olduğu tesbit edilmiş ve sorunun çözümüne yönelik yeni bir algoritmanın kullanılması önerilmiştir (Moulin ve diğ. 2001a, b). Bu araştırmacıların ortaya koyduğu sonuçlar atmosferde yoğun olarak bulunan çöl tozlarının, elektromanyetik spektrumun görünür dalga boylarında soğurma yapma özelliğine sahip olduklarını göstermiştir. 23 Haziran 1998 gününe ait SeaWiFS verileri Afrika’dan Atlantik okyanusuna çöl tozu taşındığını göstermektedir (Şekil 2.2a). Yoğun çöl tozunun bulunduğu hat üzerinde (Şekil 2.2a’da kesik siyah çizgi ile gösterilmiştir) aerosollerden kaynaklanan ışınım miktarının

(ρ_A) dalga boyunun fonksiyonu olarak gösterilmesi mavi ve yeşil dalga boylarında tozların soğurma yaptığını kanıtlamaktadır (Şekil 2.2b).



(a)

(b)



(c)

Şekil 2.2. Afrika kıyısında Atlantik okyanusu üzerine taşınan çöl tozlarının SeaWIFS ile algılanan biyo-optik özellikleri (Moulin ve diğ., 2001a ve b' den alınmıştır).

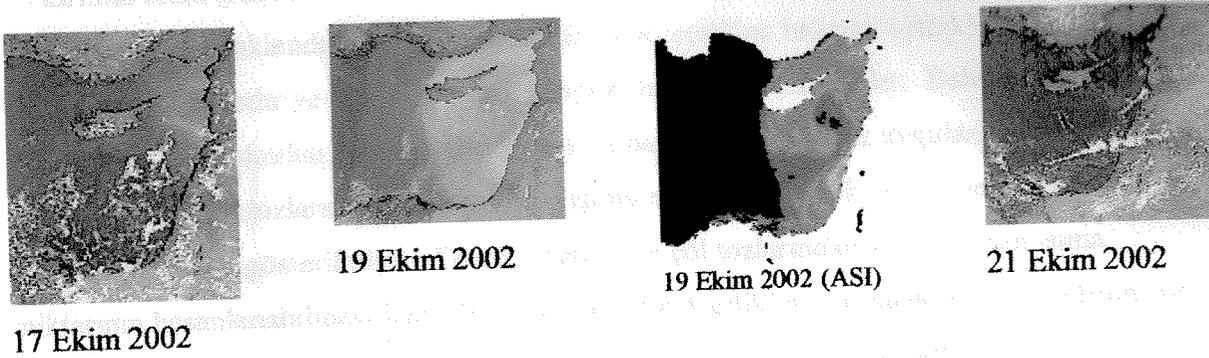
(a) 23 Haziran 1998 tarihinde Atlantik okyanusu üzerine taşınan çöl tozlarından kaynaklanan ışınım ile yüzeye ulaşan ışınım miktarları arasındaki oranın dağılımı (ρ_A).

(b) ρ_A değerlerinin (a) kesik siyah çizgi ile gösterilen hat boyunca dalga boyunun fonksiyonu olarak değişimi

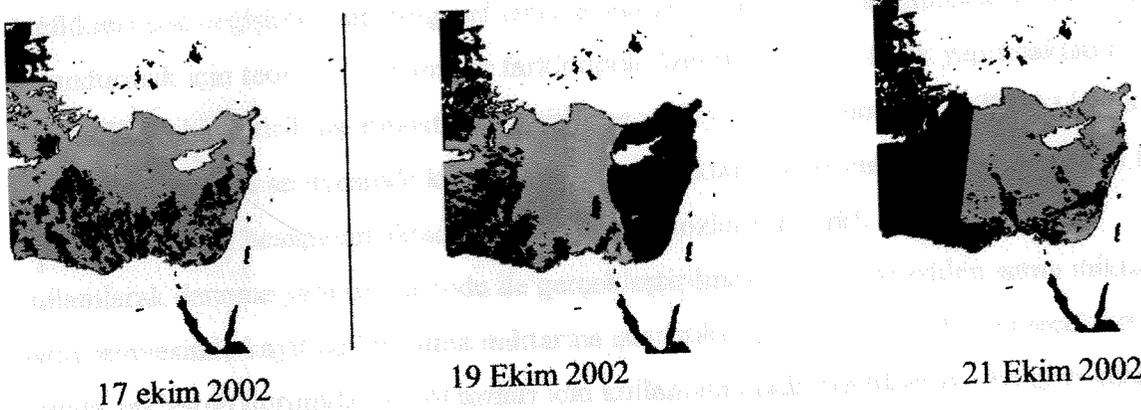
(c) 3 Ekim 1997 tarihinde Afrika kıtasından Atlantik Okyanusu'na taşınan çöl tozu olayında standart algoritma (soldaki) ve SMA algoritması ile türetilen klorofil dağılımı.

Aynı bölgenin çöl tozlarına maruz kaldığı 3 Ekim 1997 tarihine ait SeaWIFS'in standart algoritmaları (STD) ile işlenerek türetilen klorofil dağılımı Şekil 2.2c'de sunulmuştur. Standart algoritmalar atmosferde yoğun çöl tozu bulunan bölgede klorofil türetilmediği için bölgeyi gri renk ile maskelemiştir. Moulin ve diğ. (2001a) mineral tozun optik özelliklerini belirleyerek bu tozlara maruz kalan bölgeler için SMA (Spectral Matching Algorithm) algoritmasının daha gerçekçi ve standart algoritmanın maskeleymiş olduğu bölge için de klorofil dağılımını türetebildiğini göstermişlerdir (bkz Şekil 2.2c) Ayrıca standart algoritma ile türetilen klorofil dağılımının maskelenmiş bölgenin çeperlerinde yüksek derişimlerde klorofil türetmesi bu bölgelerdeki tozdan kaynaklanan soğurmanın toplam ışımaya miktarı üzerinde temizlenememiş olmasından kaynaklanmıştır.

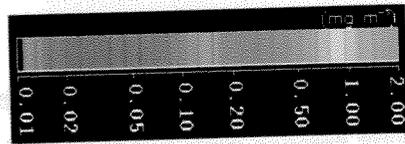
17-21 Ekim 2002 günlerine ait SeaWIFS görüntüleri doğu Akdeniz'in Orta Doğu bölgesinden kaynaklanan çöl tozlarına maruz kaldığını göstermektedir. 17 Ekim 2002 tarihinde Suriye kıyılarından doğu Akdeniz'e ulaşan çöl tozu 19 Ekim 2002 günü Kıbrıs Adasına kadar uzanarak kuzey güney kesitini kaplamıştır. 21 Ekim 2002 gününe ait SeaWIFS görüntüsünde ise çöl tozlarının deniz yüzeyine çökeldiği ve atmosferde çöl tozu kalmadığı görülmektedir. 19 Ekim 2002 gün için hesaplanan aerosollerin soğurma indisi (ASI) tozlu bölgede bulunan çöl tozlarının soğurma yapma özelliği olduğunu kanıtlamaktadır (Şekil 2.3a). Standart algoritma ile türetilen klorofil dağılımı 17, 19 ve 21 Ekim 2002 günleri için Şekil 2.3b'de gösterilmiştir. 17 Ekim gününde toz bulutunun gözlendiği alanda yama şeklinde klorofil artışı görülmektedir. 19 Ekim gününde ise standart algoritma atmosferde yoğun olarak bulunan ve soğurma özelliği olan çöl tozlarının bulunduğu alan için klorofil türetemeyip bu bölgeyi maskeleymiş ve maskeleydiği bölgenin çeperlerinde göreceli olarak yüksek klorofil derişimi türetmiştir. Kuzey güney kesitinde türetilen yüksek klorofil derişimi gerçekçi olmayıp çöl tozlarının etkisinden kaynaklanmıştır. 21 Ekim 2002 günü için standart algoritma ile türetilen klorofil dağılımı bu bölgedeki klorofil derişimin gerçekte düşük olduğunu kanıtlamaktadır. Bu örnek doğu Akdeniz'e ulaşan çöl tozlarının hem geniş bir alanı etkileyebildiği ve hemde episodik karakterde olduğunu kanıtlamaktadır. Ayrıca bu tozların güneş ışınlarını soğurdıkları ve dolayısı ile SeaWIFS'in standart algoritmasının tozlu bölgede klorofil dağılımını türetmesine engel teşkil ettiği gösterilmiştir.



(a)



(b)



Şekil 2.3. Ekim 2002 tarihine ait SeaWIFS görüntüleri.

(a) 17, 19 ve 21 Ekim 2002 tarihlerine ait SeaWIFS görüntüleri; (b) 17, 19 ve 21 Ekim 2002 tarihlerine ait klorofil dağılımı .

Ekim 2002 tarihinde gözlenen çöl tozu olayının detaylı bir biçimde incelenmesi sonucunda Doğu Akdeniz atmosferinde sıkça gözlenen çöl tozlarının optik özelliklerinin içerisinde tanımlanmış olduğu bölgesel bir algoritmanın geliştirilmesinin gereği ortaya çıkmıştır.

Afrikadan denizler üzerine taşınan çöl tozlarının okyanus rengini algılayan sensörlerin resimlerinde belirlenmesi mümkündür. Ancak bu tozların optik özellikleri hakkındaki bilgi çok kısıtlıdır. Bu tozların en önemli optik özelliği elektromanyetik spektrumun mor, mavi ve yeşil (400-500 nm) dalga boylarında soğurma yapmasıdır. Bu soğurma miktarı çöl tozlarına

ait kırılma oranı (refractive index) ile belirlenmektedir. Ancak farklı çöllerden kaynaklanan tozlar farklı (kaynaklandıkları toprağın demir oksit içeriğine bağımlı olarak) derecelerde soğurma yapmaktadır ve dolayısı ile farklı optik özelliklere sahiptirler. Daha önce Moulin ve diğ. (2001a,b) tarafından Atlantik Okyanusu'na başarılı bir biçimde uygulanan SMA algoritması ile çöl tozlarından kaynaklanan ışınım miktarının teorik yöntemlerle hesaplanabileceği gösterilmiştir. Teorik yöntem ile çöl tozlarından kaynaklanan ışınım miktarının hesaplanabilmesi için çöl tozlarının optik özelliklerinin (tanecik boyu dağılımı ve refractive index) ölçümlerle belirlenmiş olması gerekmektedir. İdeal şartlarda bu tür ölçümlerin her bölge için ayrı ayrı yapılmış olması gerekir. Çünkü çöl tozlarının optik özellikleri çok değişken olup bölgesel farklılaşma gösterirler. Bu farklılaşmayı göz önünde bulundurmak için teorik hesaplamalar farklı optik özellikler kullanılarak yapılmaktadır. Bu özellikler birleştirilmiş atmosferik temizleme ve biyo-optik algoritması (SMA) içerisine yerleştirilerek uydu seviyesinde kayıt edilen ışınım miktarı elektromanyetik spektrumun farklı dalga boyları için hesaplanmaktadır. Bu işlem çöl tozlarının farklı optik özellikleri kullanılarak deneme yanılma metodu ile gerçekleştirilmektedir. Elde edilen ışınım miktarının uydu seviyesinde kayıt edilen ışınım miktarına istatistiki açıdan doğru kabul edilecek bir oranda yaklaştığı durumda ise çöl tozları için kullanılan optik özelliklerin o bölgeyi gerçekçi olarak temsil ettiğine karar verilmektedir.

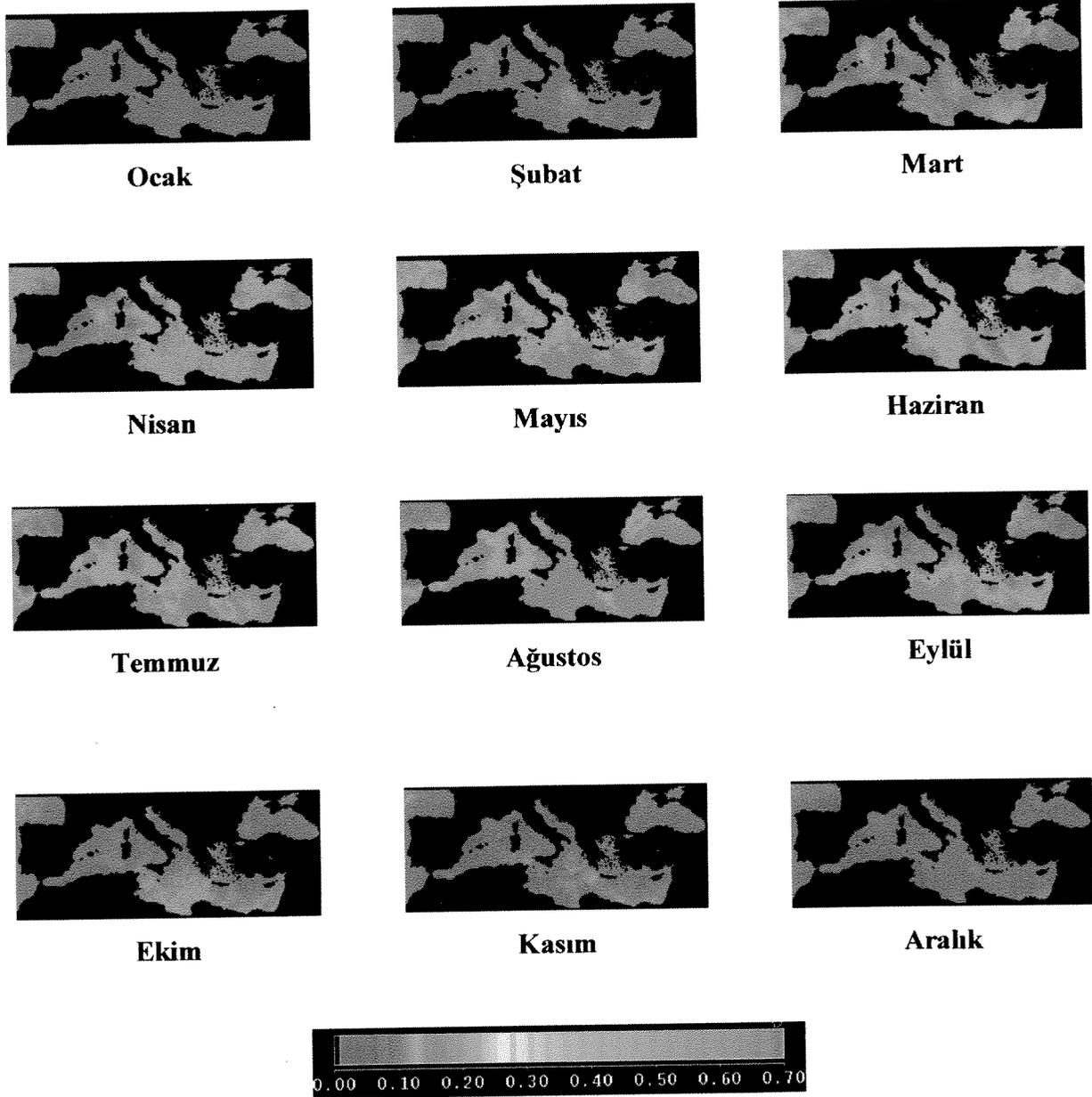
SMA algoritmasının Akdeniz'e uygulanabilmesi için bu proje çerçevesinde Dr Cyril Moulin ile işbirliği yapılmıştır. Karşılıklı gerçekleştirilen çalışma ziyaretleri sonucunda SMA algoritması SeaDAS programı içerisine eklenerek bu paket program içerisinde çalışır duruma getirilmiştir.

Özet olarak, mineral tozun fitoplanktonların sahip olduğu pigment (klorofil) ile aynı dalga boyunda soğurma yapabilme özelliğine sahip olduğu için standart algoritmalar tozlu bölgelerde gerçek değerinden daha fazla klorofil miktarı türetebilmektedir. Ayrıca atmosferde yüklü miktarda çöl tozu bulunduğu durumlarda standart algoritma, atmosferik temizleme işlemini yapamadığı için toz bulutunun altında kalan denizsel bölgenin biyo-optik (klorofil) özelliği ile ilgili bilgi türetemeyip bu bölgeleri maskeleymektedir.

3. SONUÇLAR

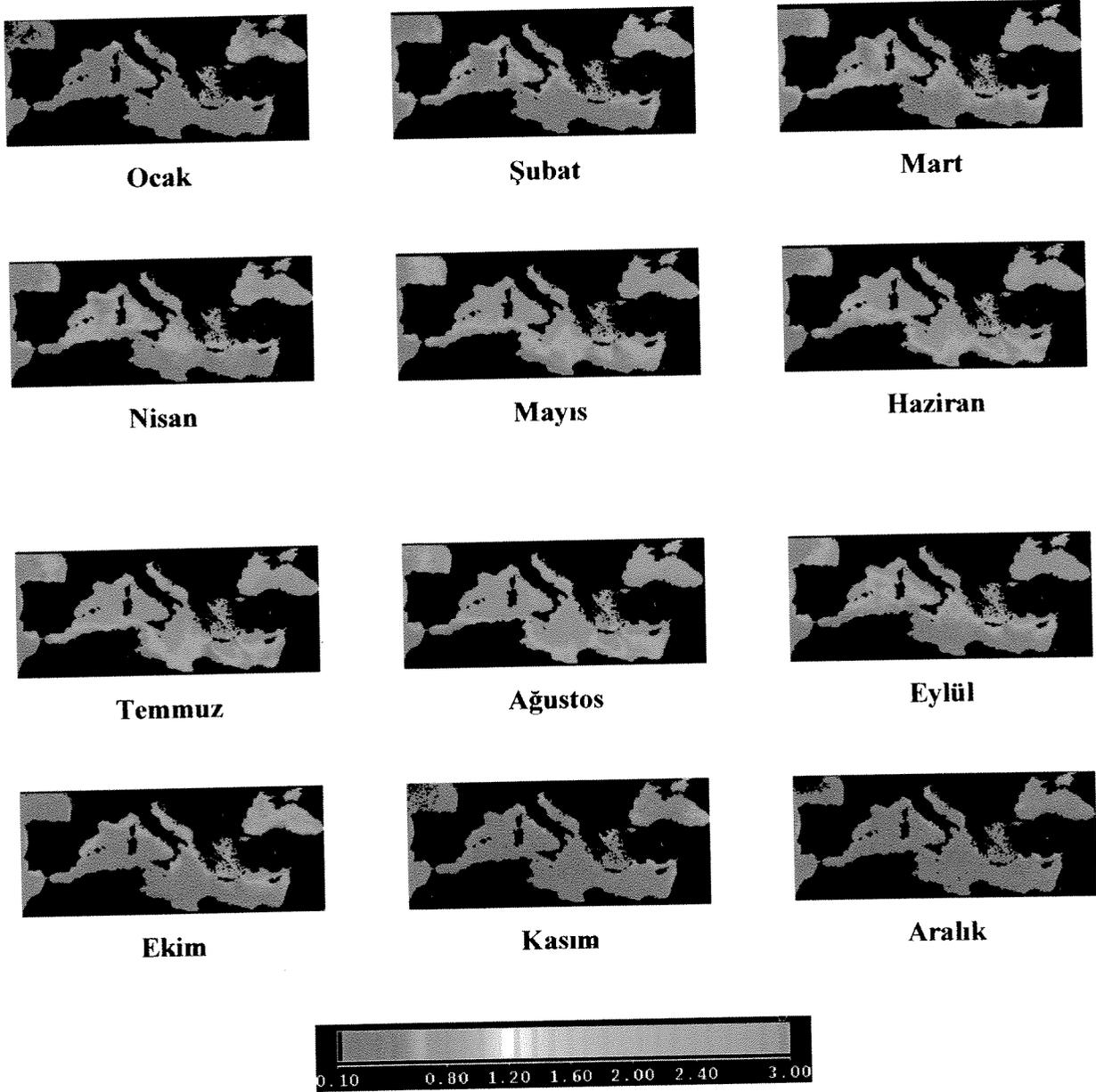
3.1. SeaWIFS Verileri ile Türetilen Akdeniz'in Biyo-optik Özellikleri

SeaWIFS verilerinin işlenmesi için dizayn edilen standart küresel algoritmalar ile elde edilen atmosferik ve denizsel bilgilerin tüm Akdeniz basenindeki dağılımı Şekil 3.1, 3.2 ve 3.3'de sunulmuştur. Aylık ortalamalar 1997-2002 dönemine aittir.



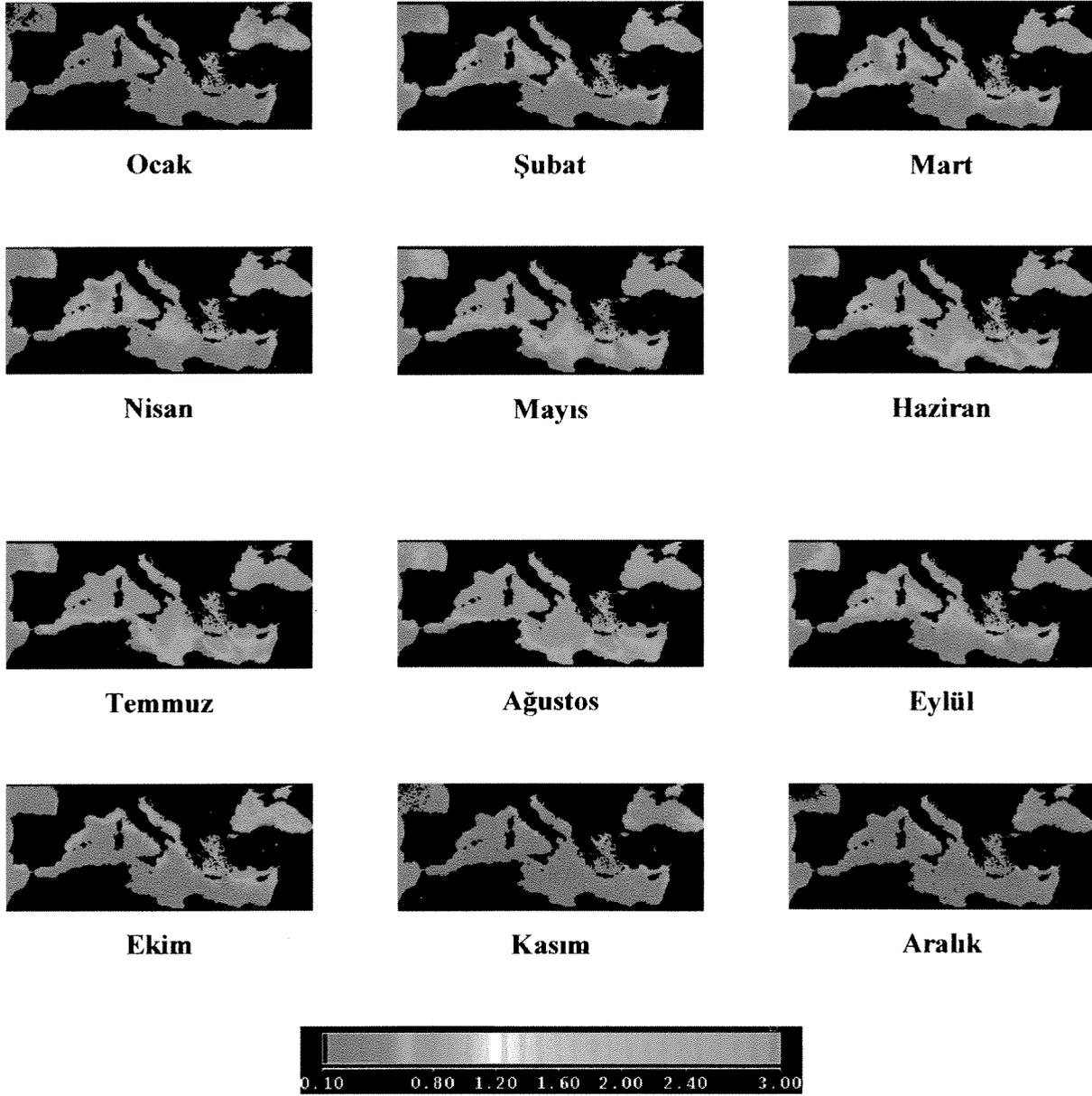
Şekil 3.1. Aerosollerin optik kalınlığının Akdeniz baseni üzerindeki aylık dağılımı.

Şekil 3.1.'de gösterilen SeaWIFS'in atmosferik temizleme algoritmasının 865 nm dalga boyu için türettiği aerosollerin optik kalınlığı dağılımı Akdeniz baseni üzerindeki aerosol miktarının mevsimsel dağılımı hakkında fikir vermektedir. Aerosol miktarı Mart ayında artmaya başlayarak yaz aylarında maksimum seviyelerine ulaşmakta Ekim ayında yeniden azalmaktadır. Aerosollerin optik kalınlığı bilgisi aerosollerin türü hakkında bilgi vermemekle beraber aerosol bulutlarının karasal bölgelerden (özellikle kuzey Afrika kıyısından) kaynaklanarak Akdeniz üzerinde yayıldığını açıkça göstermektedir.



Şekil 3.2. Angstrom katsayısının Akdeniz baseni üzerindeki aylık dağılımı.

Şekil 3.1.'de gösterilen SeaWIFS'in atmosferik temizleme algoritmasının 865 nm dalga boyu için türettiği aerosollerin optik kalınlığı dağılımı Akdeniz baseni üzerindeki aerosol miktarının mevsimsel dağılımı hakkında fikir vermektedir. Aerosol miktarı Mart ayında artmaya başlayarak yaz aylarında maksimum seviyelerine ulaşmakta Ekim ayında yeniden azalmaktadır. Aerosollerin optik kalınlığı bilgisi aerosollerin türü hakkında bilgi vermemekle beraber aerosol bulutlarının karasal bölgelerden (özellikle kuzey Afrika kıyısından) kaynaklanarak Akdeniz üzerinde yayıldığını açıkça göstermektedir.



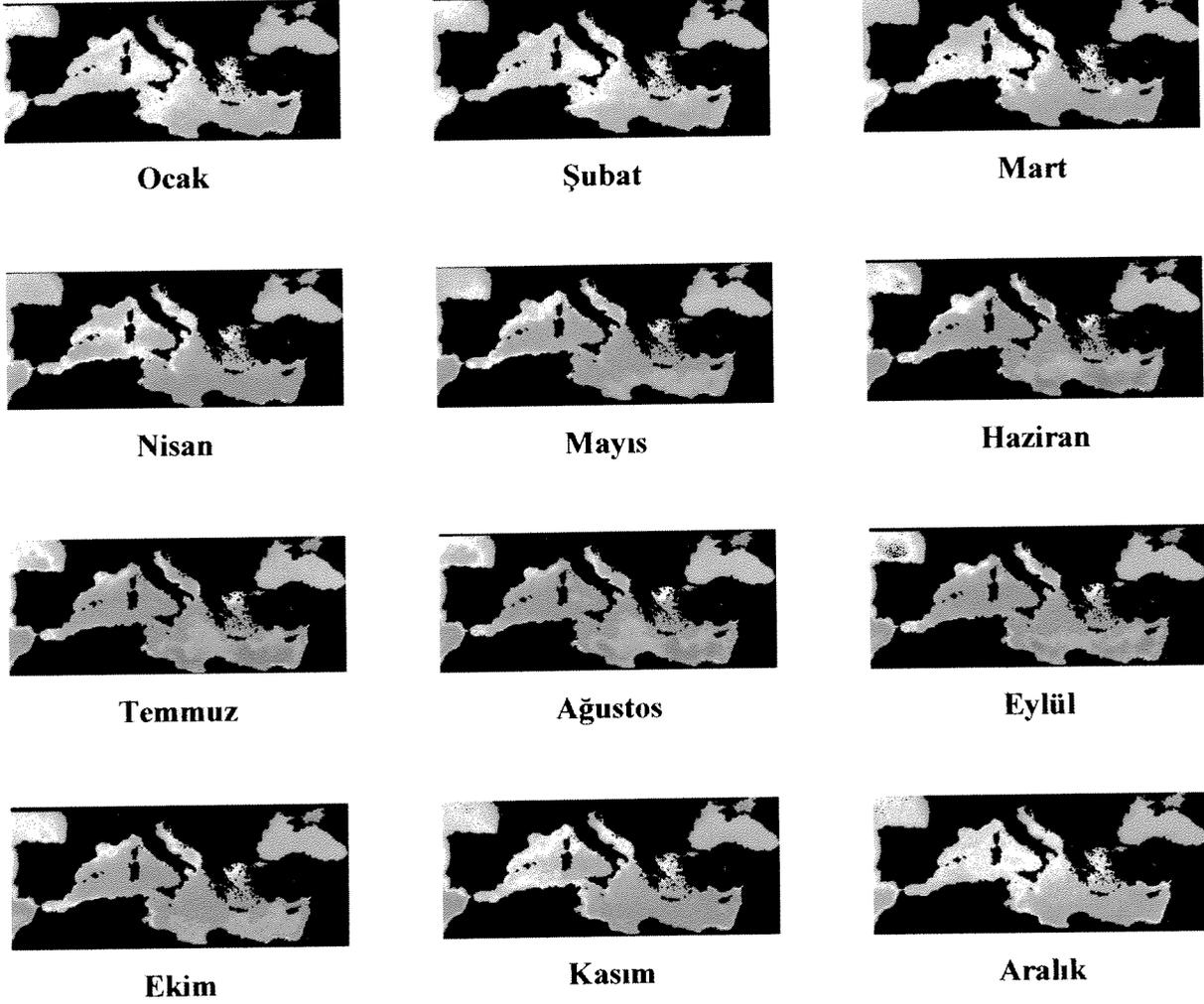
Şekil 3.2. Angstrom katsayısının Akdeniz baseni üzerindeki aylık dağılımı.

Şekil 3.2’de ise 510 ve 865 nm dalga boyları için hesaplanmış olan angstrom katsayısının Akdeniz baseni üzerindeki dağılımı sunulmuştur. Angstrom katsayısı atmosfer kolonundaki aerosollerin parçacık boyutu (kaynakları) ile ilgili bilgi vermektedir. Küçük katsayılar (yaklaşık 0-0.5 arasında değişen değerler) deniz tuzu ve mineral toz gibi doğal kaynaklı ve büyük tanecik boyutuna sahip aerosollerin, büyük katsayılar ise (yaklaşık 0.5-1 arasında değişen değerler) sülfat ve kara karbon gibi antropojenik kaynaklı ve küçük tanecik boyutuna sahip aerosollerin atmosferde baskın olarak bulunduğu işaret etmektedir.

Bu nedenle, Kuzey Afrika kıyılarında gözlenen aerosol bulutunun (bknz. Şekil 3.1) angstrom katsayısının düşük olması (bknz. Şekil 3.2) bu bölgelerdeki aerosollerin çöl bölgelerinden kaynaklanan mineral toz olduğu öngörüsünü kuvvetlendirmektedir.

Şekil 3.3’te klorofil pigmentinin tüm Akdeniz baseni boyunca mevsimsel dağılımı görülmektedir. Genel olarak Akdeniz’in batısının doğusuna nisbeten biyolojik açıdan daha zengin olduğu ilk göze çarpan özelliktir. Ocak-Nisan ve Kasım-Aralık ayları arasında doğu Akdeniz’de klorofil derişimi homojen olarak $0.1 - 0.5 \text{ mg m}^{-3}$ civarında görülmektedir. Mayıs ayından başlamak üzere Ekim ayna kadar kıyısız alanlar hariç olmak üzere tüm doğu baseninde klorofil değerleri oldukça düşük seviyelerde görülmektedir.

Kış aylarında nisbeten daha yüksek derişimlerde klorofil gözlenmesinin nedeni olarak su kolonundaki dikey yöndeki karışım ile, ışıklı tabakaya fitoplanktonların fotosentez yapmak için ihtiyaç duydukları besin tuzlarının taşınmış olması gösterilebilir. Nisan ayından itibaren havanın ısınması ile oluşan termoklin tabakası dikey yöndeki karışımı engelleyerek besin tuzlarının yüzey sularına geçmesini önlemekte ve dolayısı ile klorofilin çok düşük seviyelerde gözlenmesine neden olmaktadır. Kasım ayında hava sıcaklığının düşmesi ve termoklin tabakasının bozulması ile dip sulardan yüzeye besin tuzu ulaşmasına elverişli koşullar yeniden oluşur. Bu durum klorofil değerlerinin, yaz aylarına nisbeten göreceli olarak yükselmesine neden olur (bknz. Şekil 3.3).

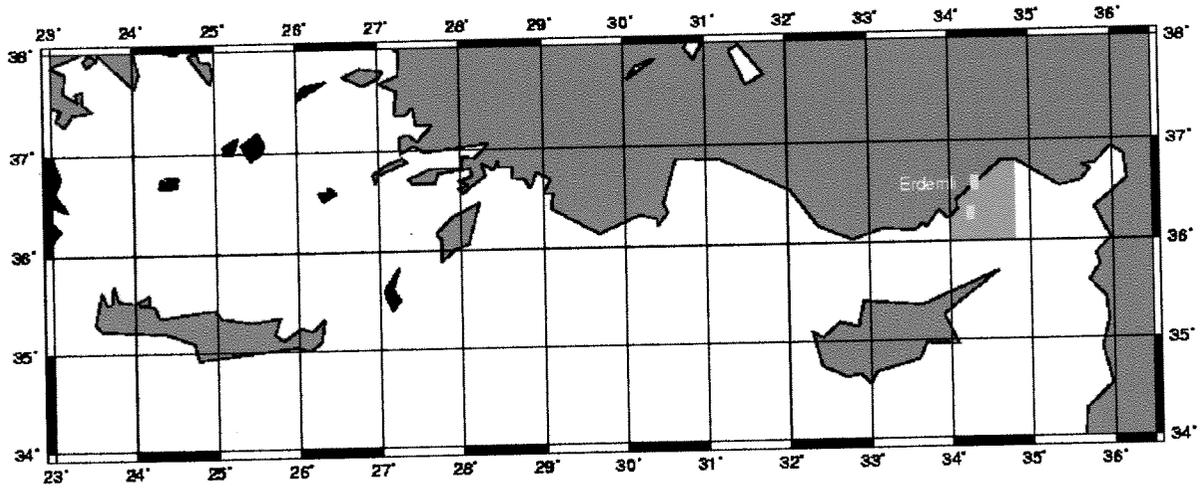


Şekil 3.3. Klorofil pigmentinin Akdeniz yüzeyindeki aylık dağılımı.

3.2. SeaWIFS Sensörünün Kayıt Ettiği Verilerden Türetilen Klorofil ve Aerosollerin Optik Kalınlığı Verilerinin Yer Ölçümleri ile Karşılaştırılması

Bu bölümde SeaWIFS'in standart algoritması ile türetilen klorofil ve aerosollerin optik kalınlığı değerleri yer ölçümleri ile karşılaştırılacaktır. Bu karşılaştırma 2000 yılı için gerçekleştirilmiştir. ODTÜ-Deniz Bilimleri Enstitüsü Kimyasal Oşinografi Bölümünde 1997

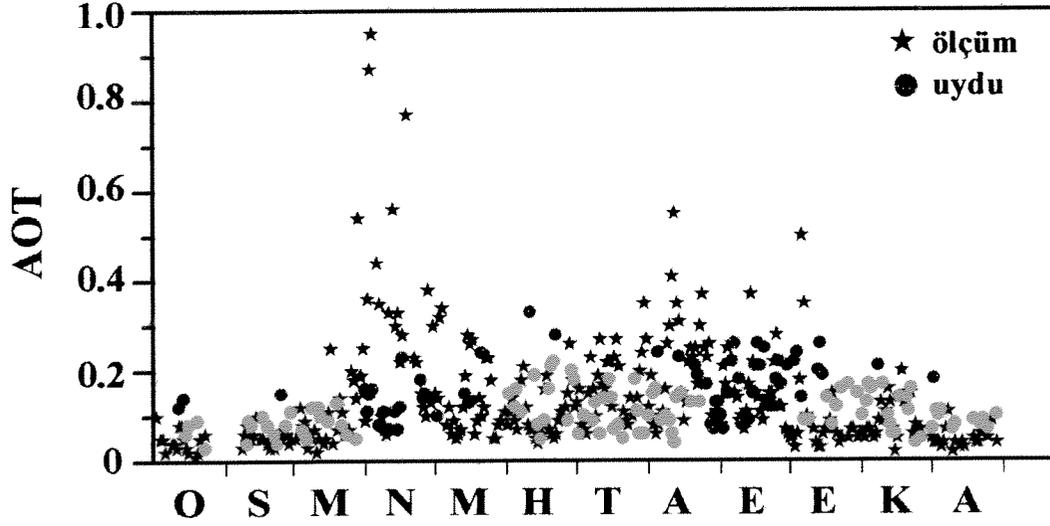
yılında başlatılıp halen devam etmekte olan uzun dönemli haftalık deniz ölçümleri gerçekleştirilmektedir. Ölçümü gerçekleştirilen fiziksel ve biyo-kimyasal parametreler arasında klorofil de bulunmaktadır. Enstitü'nün NASA ile yürütmekte olduğu işbirliği çerçevesinde ise güneş fotometresi ile yer seviyesinde aerosollerin optik kalınlığı ölçülmektedir. Bu ölçümler AERONET isimli küresel ölçüm ağına dahil olup veriler kullanıcıya açıktır (<http://aeronet.gsfc.nasa.gov:8080/>). SeaWIFS sensöründen elde edilen uzaktan algılama parametrelerinin doğu Akdeniz bölgesinde doğrulanması için bahsi geçen programlar çerçevesinde elde edilen yer ölçümleri (klorofil ve aerosollerin optik kalınlığı) kullanılmıştır. Güneş fotometresi ile aerosollerin optik kalınlığı ölçümleri Erdemli'de gerçekleştirilmektedir (bknz Şekil 3.4). Bu ölçümler ile SeaWIFS verilerinden türetilen aerosollerin optik kalınlığının karşılaştırılması için ise Şekil 3.4'te kırmızı renk ile taralı alan için türetilen aerosollerin optik kalınlığı karşılaştırılmıştır. Haftalık klorofil ölçümü ise Erdemli açıklarından tekne ile alınan yüzey suyu numunelerinde (Şekil 3.4'de sarı renk ile gösterilen istasyon) floremetrik method ile gerçekleştirilmiştir. Klorofil ölçüm değerlerinin uzaktan algılama metodu ile türetilen klorofil değerleri ile uyumuna bakmak için ise yine sarı renkli bölge için SeaWIFS'in standart algoritması ile türetilen klorofil değerleri kullanılmıştır.



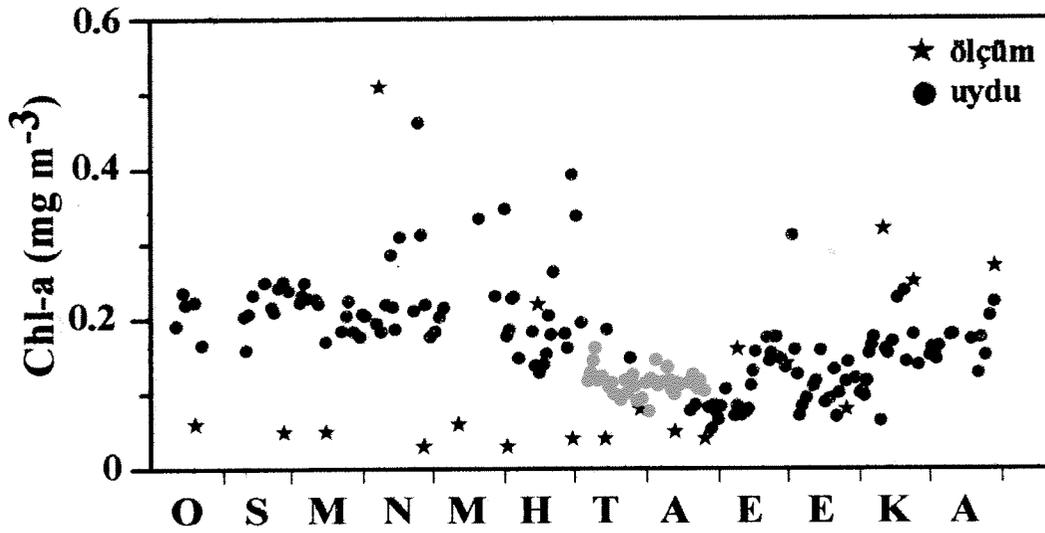
Şekil 3.4. Yer ölçüm istasyonları ve uzaktan algılama verilerinin türetildiği alanın harita üzerinde gösterimi.

Uzaktan algılama metodu ile (SeaWIFS verilerinin standart algoritma ile proses edilmesi ile elde edilen) türetilen 2000 yılına ait aerosollerin optik kalınlığı ve klorofil değerlerinin yer ölçümleri ile karşılaştırılması Şekil 3.5a,b'de sunulmuştur.

865 nm dalga boyunda ölçülen ve SeaWIFS verilerinden türetilen aerosollerin optik kalınlığı 0.2'den küçük değerler için birbirleriyle uyumlu iken 0.2'den büyük optik kalınlık değerleri ölçülen günlerde uzaktan algılama metodu ile aerosollerin optik kalınlığının belirlenemediği görülmektedir (Şekil 3.5a).



(a)



(b)

Şekil 3.5 2000 yılı için uzaktan algılama verilerinin yer ölçümleri ile karşılaştırılması.

(a) Aerosollerin optik kalınlığı; (b) Klorofil derişimi

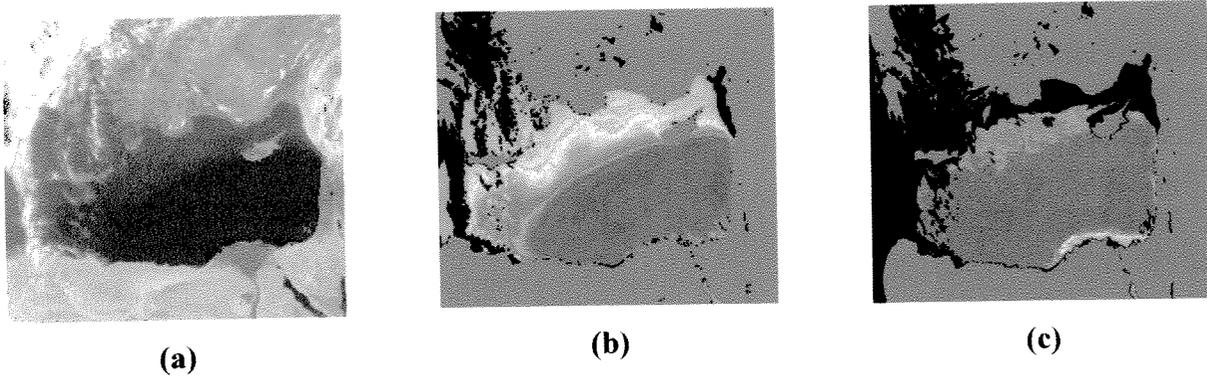
0.05 mg m⁻³ civarında ölçülen klorofil derişimlerinin SeaWIFS algoritması ile yaklaşık 4 kat daha fazla türetildiği (0.2 mg m⁻³ civarında), 0.1 mg m⁻³ ve daha büyük derişimlerde ölçülen

klorofil miktarlarının ise uzaktan algılama metodu ile kabul edilebilir bir hata aralığında türetildiği gözlenmiştir (Şekil 3.5b).

3.3. Akdeniz Atmosferinde Çöl Tozlarının Bulunduğu Durumlarda SeaWIFS Sensörü Verileri ile Türetilen Biyo-optik Parametreler

Bu bölümde Nisan aylarında Akdeniz üzerinde gözlenen yoğun çöl tozu bulutlarının SeaWIFS sensörünün standart algoritması ile türetilen klorofil dağılımını nasıl etkilediği gösterilecektir. Daha sonra bu araştırma kapsamı içerisinde kullanılan SMA algoritması ile elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılarak çöl tozlarının optik özelliklerinin algoritmalar içerisinde tanımlanmasının gereği kanıtlanacaktır.

Uzaktan algılama verileri kullanılarak Afrika ve Akdeniz üzerindeki çöl tozu miktarı ve bu tozların atmosferik taşınım yolları uzun dönemli olarak Moulin ve diğ., (1998); Israelevich ve diğ., (2002) tarafından incelenmiştir. Bu araştırmaların sonuçları Mart-Ağustos döneminde Kuzey Afrika atmosferinin çöl tozları ile yüklü olduğunu ortaya koymuştur. Ayrıca bu tozların Akdeniz'in batısına yaz aylarında (maksimum toz miktarı temmuz ayında gözlenmiştir) doğusuna ise bahar aylarında (maksimum toz miktarı Nisan ayında gözlenmiştir) yoğun miktarlarda taşındığı gösterilmiştir.

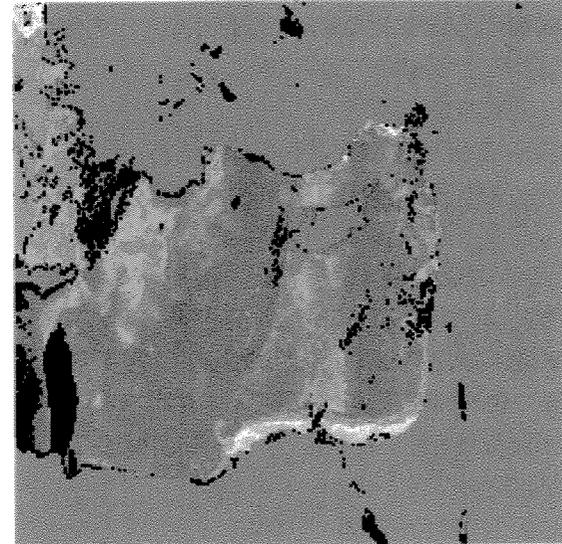
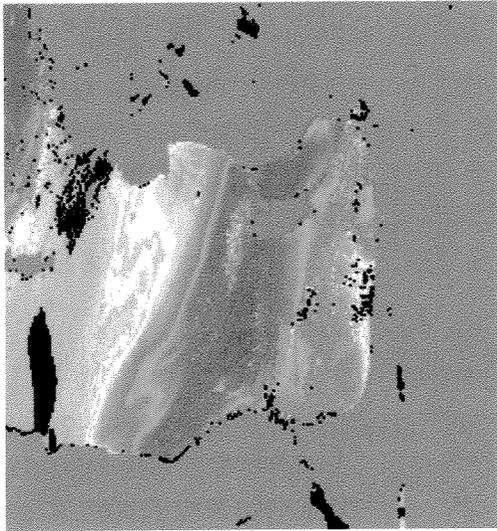
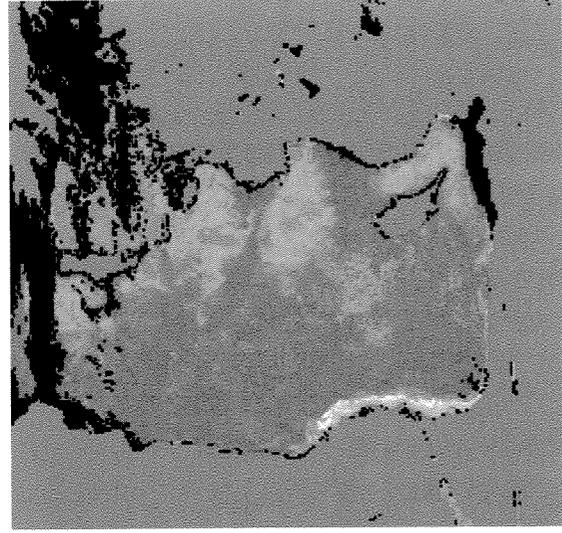
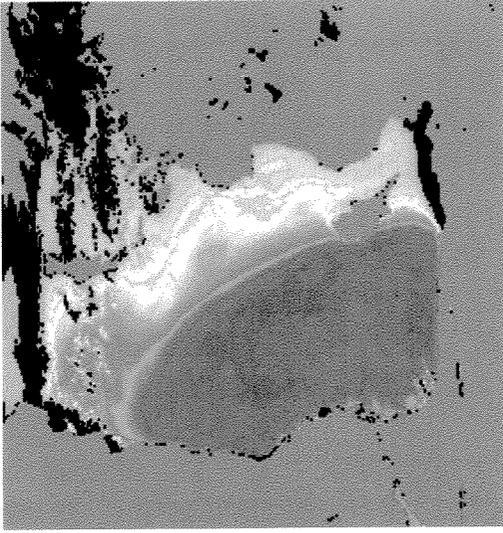


Şekil 3.6. 11 Nisan 1998 gününe ait SeaWIFS sensöründen elde edilen bilgiler.

- (a) Doğu Akdeniz'in uzaktan algılanan rengi (true color)
- (b) SeaWIFS'in standart algoritması ile türetilen aerosollerin optik kalınlığı (τ)
- (c) SeaWIFS'in standart algoritması ile türetilen klorofil dağılımı

11 Nisan 1998 gününe ait SeaWIFS görüntüsü (bkz. Şekil 3.6a) doğu Akdeniz üzerindeki toz bulutunu göstermektedir. Şekil 3.6b'de SeaWIFS'in standart algoritması ile türetilen ve açık maviden kırmızıya doğru bir artış gösteren aerosollerin optik kalınlığının (konsantrasyonunun) dağılımı ise Şekil 3.6a'da doğu Akdeniz üzerindeki sarı bulutun aerosollerden kaynaklandığını doğrulamaktadır. SeaWIFS'in standart algoritması ile türetilen klorofil dağılımı ise (Şekil 3.6c) çöl tozunun yoğun olarak bulunduğu bölgede (bkz. Şekil 3.6b, kırmızılı bölge) standart algoritmanın atmosferik temizleme işini başarılı bir şekilde yapmadığı için klorofil türetilemeyip siyah renk ile maskelendiğini göstermektedir. Çöl tozunun göreceli olarak daha az olduğu bölgenin altında (bkz. Şekil 3.6b, açık mavi-sarı olan bölge) ise klorofil miktarında artış görülmektedir. Sadece tozlu bölgenin altında kalan kısımda yüksek klorofil dağılımı gerçekçi olmayıp SeaWIFS'in standart biyo-optik algoritmasının atmosferinde toz olan bölgeler için başarılı sonuç türetilmediğini göstermektedir. Bu örnekte görüleceği üzere SeaWIFS'in standart algoritmaları (atmosferik temizleme ve biyo-optik algoritmaları) Doğu Akdeniz üzerinde yoğun çöl tozu bulunduğu durumlarda başarılı sonuçlar türetememektedir. Dolayısı ile çöl tozlarının optik özelliğini (elektromanyetik spektrumun görünür dalga boylarında soğurma yapıları) içeren bölgesel algoritmalar kullanılmalıdır. Moulin ve diğ. (2001a,b) nin çöl tozlarına maruz kalan Atlantik Okyanusu bölgesine uygulamış oldukları SMA (Spectral Matching Algorithm) algoritmasının 11 ve 13 Nisan 2000 tarihlerine ait SeaWIFS verilerine uygulanması ile elde edilen klorofil dağılımı Şekil 3.7'de sunulmuştur.

SMA algoritması ile elde edilen klorofil dağılımı (Şekil 3.7b), bu algoritmanın standart algoritmaya nisbeten Doğu Akdeniz için daha başarılı olacağına dair ipucu vermiştir. Şekil 3.6c'de görüleceği üzere 11 Nisan günü için standart algoritma atmosferde yoğun toz bulutu olan bölgeyi maskeleyerek kapatmış ve klorofil bilgisi türetememiştir. SMA algoritması ise Şekil 3.7a'da 11 ve 13 Nisan günlerinde gözlenen yoğun toz bulutunun (kırmızılı bölgeler) altında kalan denizsel bölge için klorofil dağılımı türetebilmektedir. Ancak toz bulutunun altında kalan bölgelerdeki yama biçimindeki klorofil dağılımı (Şekil 3.7b) gerçekçi değildir. Bu durum SMA algoritması içerisinde tanımlanan mineral tozun optik özelliklerinin daha önce Moulin ve diğ. (2001a,b) tarafından kullanılan ve Atlantik Okyanusu üzerine taşınan çöl tozlarına ait olmasından ileri geldiği düşünülmektedir. SMA algoritmasının içerisinde Doğu Akdeniz 'de gözlenen çöl tozlarının optik karakteristiğinin tanımlanması koşulu ile daha gerçekçi klorofil dağılımı elde edilebileceği düşünülmektedir .



(a)

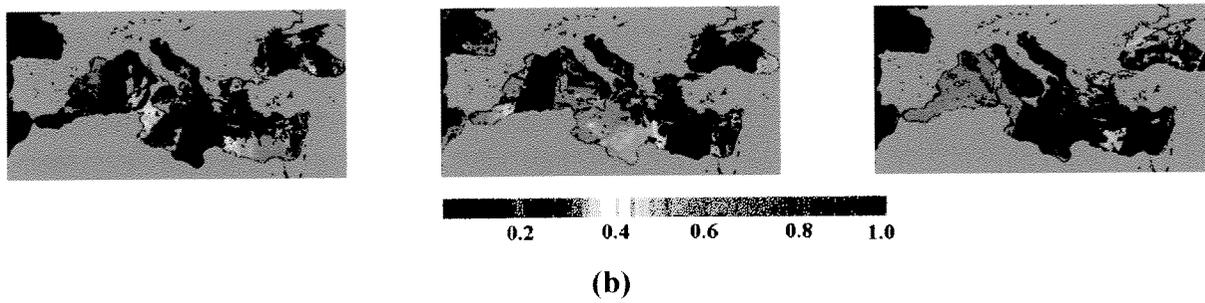
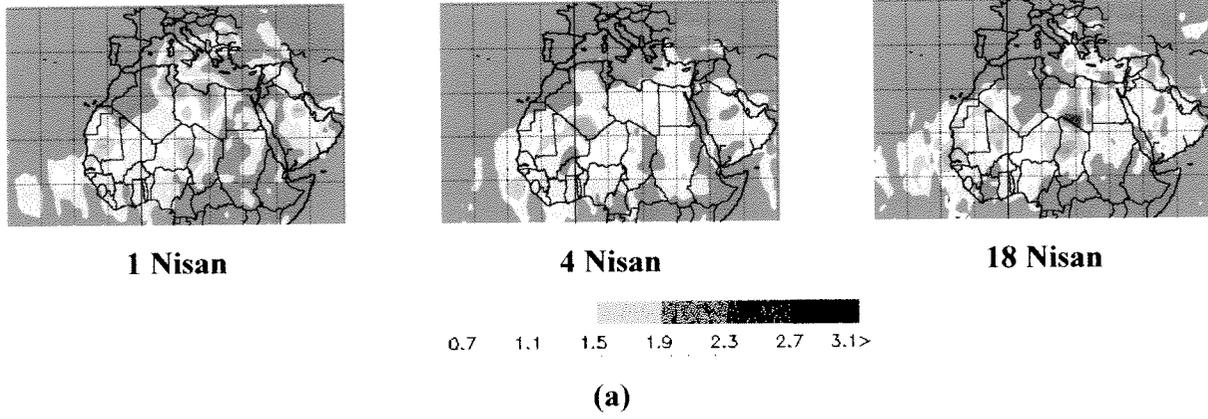
(b)

Şekil 3.7. 11 ve 13 Nisan 1998 günlerine ait uzaktan algılama bulguları.

(a) SeaWiFS'in standart algoritması ile türetilen aerosollerin optik kalınlığı

(b) SMA algoritması ile türetilen klorofil dağılımı

Akdeniz atmosferinde bulunan çöl tozlarının optik karakteristiğinin belirlenmesi için Nisan 2000'in ilk yarısında gözlenen çöl tozu seçilmiştir (Şekil 3.8).



Şekil 3.8. Nisan 2000'in ilk yarısında Akdeniz'e taşınan çöl tozu.

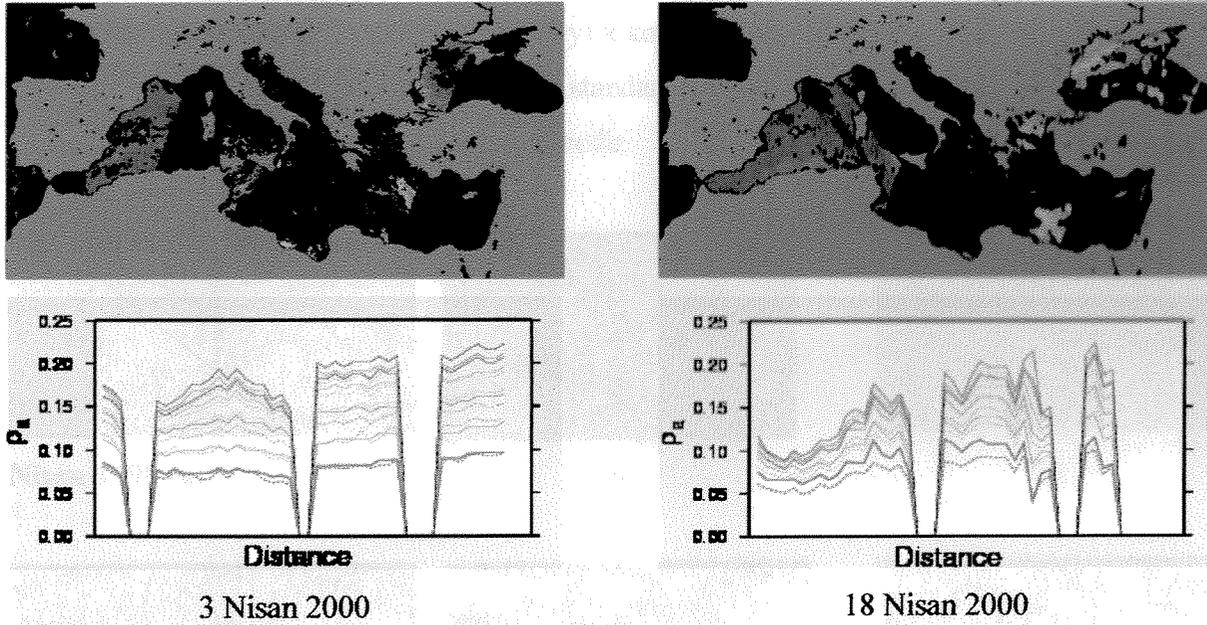
(a) TOMS sensörünün kayıt ettiği verilerden türetilen aerosol indisi

(<http://jwocky.gsfc.nasa.gov/pub/tmp/meduse/>)

(b) SeaWiFS sensörünün 865 nm dalga boyunda kaydettiği verilerden hesaplanmış olan aerosollerden kaynaklanan ışınma (ρ_a)

Şekil 3.8a'da TOMS sensörünün verilerden türetilen aerosol indisinin dağılımı, Afrika ve Arap Yarımadasından kaynaklanan çöl tozlarının Akdeniz üzerine taşındığını göstermektedir. Bu sensörün verileri ile elektromanyetik spektrumun morötesi dalga boylarında soğurma yapan aerosollerin kara ve deniz üzerindeki dağılımının tesbit edilmesi mümkündür. Çöl tozlarının soğurma kabiliyeti olmasından dolayı bu sensörün verileri kullanılarak tozların kaynak bölgeleri ve Atlantik Okyanusu ile Akdeniz üzerindeki dağılımı başarılı bir şekilde tanımlanmıştır (Herman ve diğ., 1997; Israelevich ve diğ., 2002). Nisan 2000'in ilk yarısında Akdeniz üzerinde gözlenen çöl tozlarının kaynak bölgelerinin Libya, Mısır (1 ve 4 Nisan) ve Arap yarımadası (18 Nisan) olduğu görülmektedir (bknz. Şekil 3.8a). Akdeniz üzerine taşınan tozlar farklı çöllere kaynaklandığı için optik özellikleride farklı olabilir. Şekil

3.8b’de ise 3.8a’da sunulan günlere karşılık gelen SeaWIFS verilerinden türetilmiş olan çöl tozlarından kaynaklanan ışıma miktarı sunulmuştur. SeaWIFS verileri ile sadece denizlerin üzerindeki aerosoller gözlemlendiği için Akdeniz üzerindeki tozlardan kaynaklanan ışıma miktarları görülmektedir. Su bulutu olan bölgelerde aerosollerden kaynaklanan ışıma miktarı türetilmediği için bu bölgeler siyah renk ile maskelenmiştir.



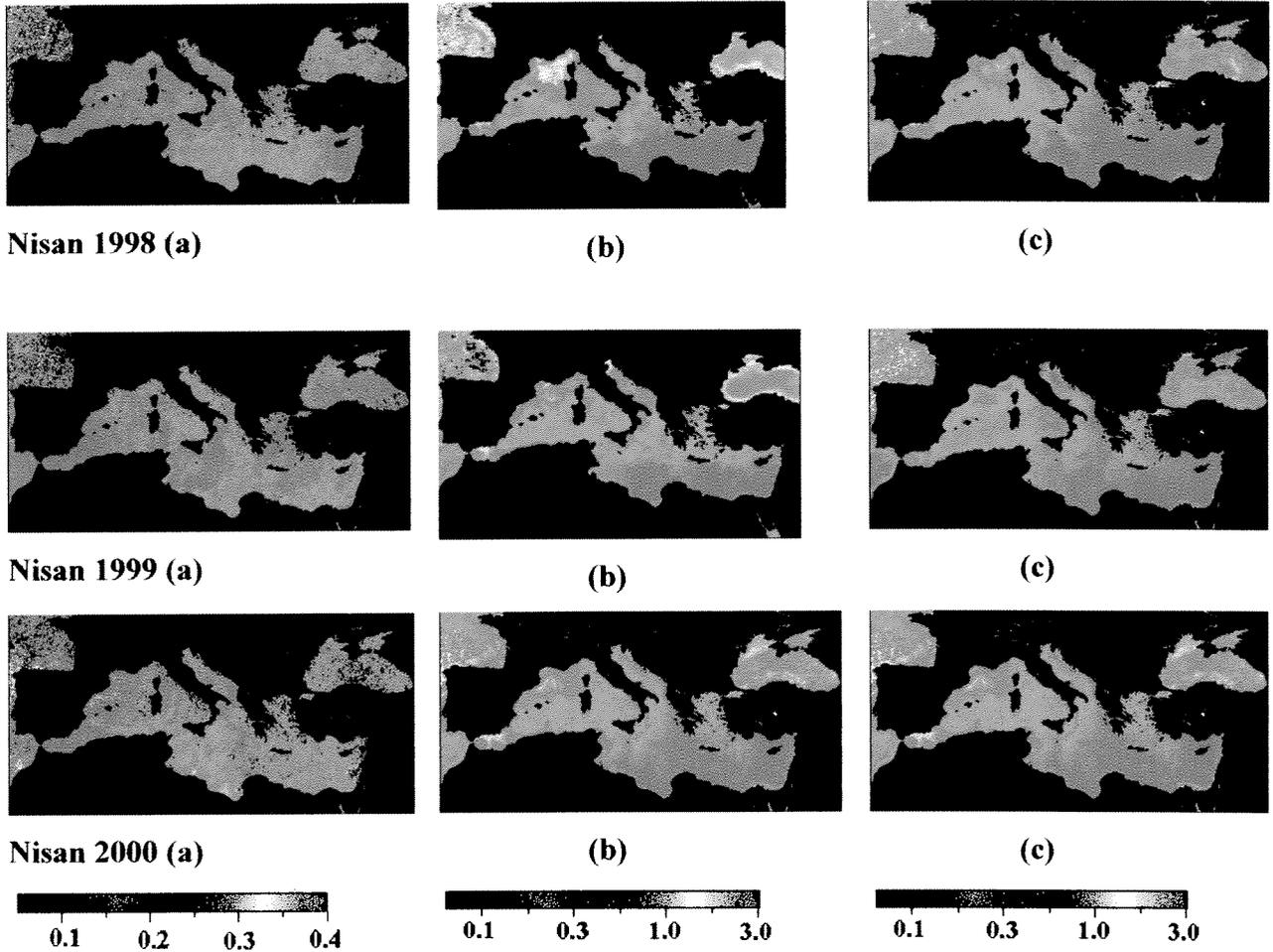
Şekil 3.9. Kuzey Afrikadan (3 Nisan 2000) ve Arap yarımadasından (18 Nisan 2000) kaynaklanan çöl tozlarına (aerosollere) ait ışıma miktarının (pa) dağılımı.

Kuzey Afrika’dan ve Arap Yarımadasından kaynaklanarak atmosferik taşınım ile Akdeniz üzerine ulaşan çöl tozu bulutlarının üzerinden bir hat çekilerek aerosollerden kaynaklanan ışıma miktarı (pa) elektromanyetik spektrumun farklı dalga boylarında hat boyunca Şekil 3.9’da sunulmuştur. Şekilde düz çizgi ile gösterilen pa değerleri SeaWIFS’in ölçümleri olup kesik çizgi ile gösterilen değerler ise içerisinde çöl tozlarının optik özelliklerinin tanımlandığı SMA algoritması ile türetilenlerdir. 3 Nisan 2000 tarihinde Kuzey Afrika’dan taşınan çöl tozları için SMA algoritması ile türetilen pa değerleri SeaWIFS ölçümleri ile uyumlu iken 18 Nisan 2000 tarihinde Arap Yarımadasından taşınan çöl tozları için ölçülen ve türetilen pa değerlerinin birbirinden farklı olduğu görülmektedir.

Bu örnekten görüleceği üzere Akdeniz’e taşınan çöl tozlarının optik karakteristiği kaynaklarına göre farklı olabilmektedir. Dolayısı ile SMA algoritmasının istenilen doğrulukta

klorofil dağılımını türetebilmesi ancak bölgeyi etkileyen farklı kaynaklı çöl tozlarının optik karakteristiklerinin algoritmanın içerisinde tanımlanması ile mümkün olacaktır.

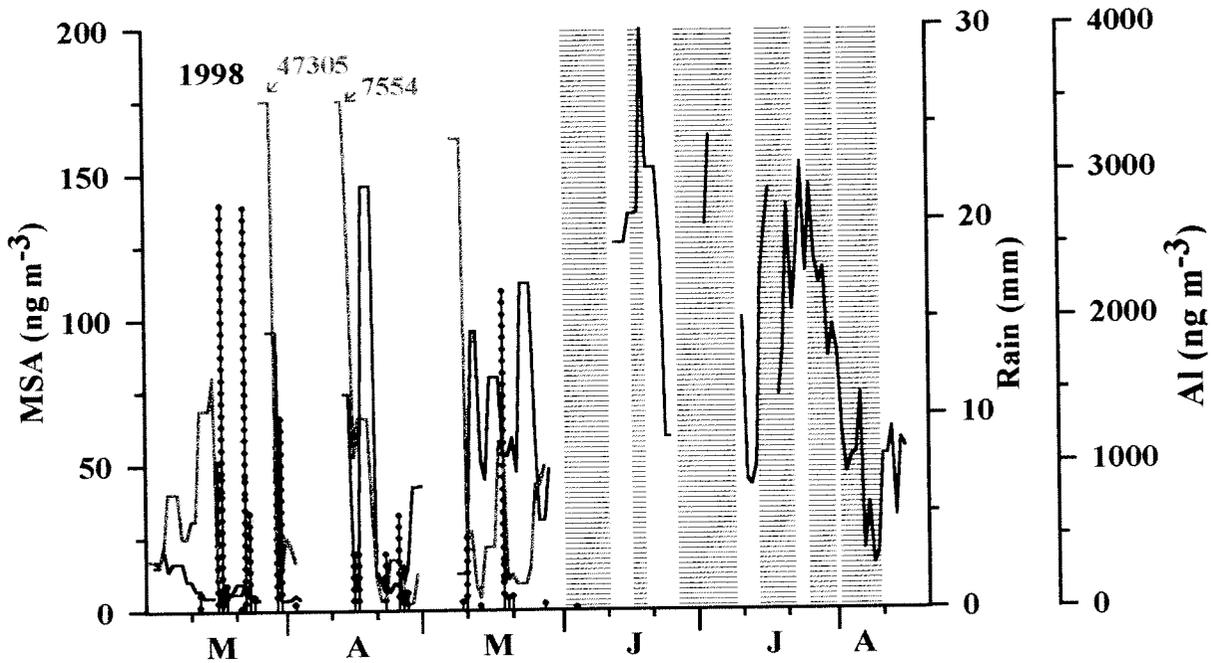
Şekil 3.10'da 1998, 1999 ve 2000 yılları Nisan ayı için SeaWIFS'in ölçümlerinden hesaplanan pa değerleri ile birlikte standart ve SMA algoritması ile türetilen klorofil dağılımı verilmiştir. Ölçülen pa değerlerinin her üç yıl için dağılımı Nisan ayında Akdeniz'in çöl tozlarından etkilendiğini göstermektedir. Aylık kompozit klorofil dağılımı, SMA algoritmasının türettiği klorofil dağılımının standart algoritmanın türettiği dağılıma nisbeten daha gerçekçi sonuçlar verdiğini göstermektedir.



Şekil 3.10. 1998, 1999 ve 2000 yılları Nisan aylarına ait SeaWIFS ile ölçülen aerosollerden kaynaklanan ışınma değerleri (a) ile standart (b) ve SMA (c) algoritmaları ile türetilen klorofil derişiminin Akdeniz basenindeki dağılımı.

3.4. Deniz Atmosfer Etkileşiminin Gösterilmesi Amacı ile Uzaktan Algılama Metodunun Kullanılması

Deniz ekosistemindeki biyolojik aktivitenin göstergesi klorofil pigmentidir. Klorofilin yanısıra denizlerin ışıklı tabakasında yaşayan fitoplanktonların metabolik prosesleri esnasında ürettikleri dimetil sülfid (DMS) de biyolojik aktivitenin bir göstergesidir. Denizlerdeki klorofil ile DMS arasındaki ilişki Simo ve Dachs (2002) tarafından gösterilmiştir. Deniz yüzeyinde yaşayan fitoplanktonlarca üretilen DMS gazı atmosfere kaçarak atmosferdeki bir dizi fotokimyasal süreçlerden geçip metan sülfonat (MSA) aerosollerine dönüşürler. MSA'nın atmosferde bulunmasının yegane kaynağı denizsel üretilmiştir. Dolayısı ile aerosollerde ölçülen MSA derişimleri ile denizsel üretim arasında ilişki olması beklenir. Bu proje kapsamında Erdemli'de bulunan örnekleme kulesinden geçmişte toplanan aerosol numunelerinde gerçekleştirilen MSA analizlerinin sonuçları ile denizsel üretim arasındaki ilişki araştırılmıştır.

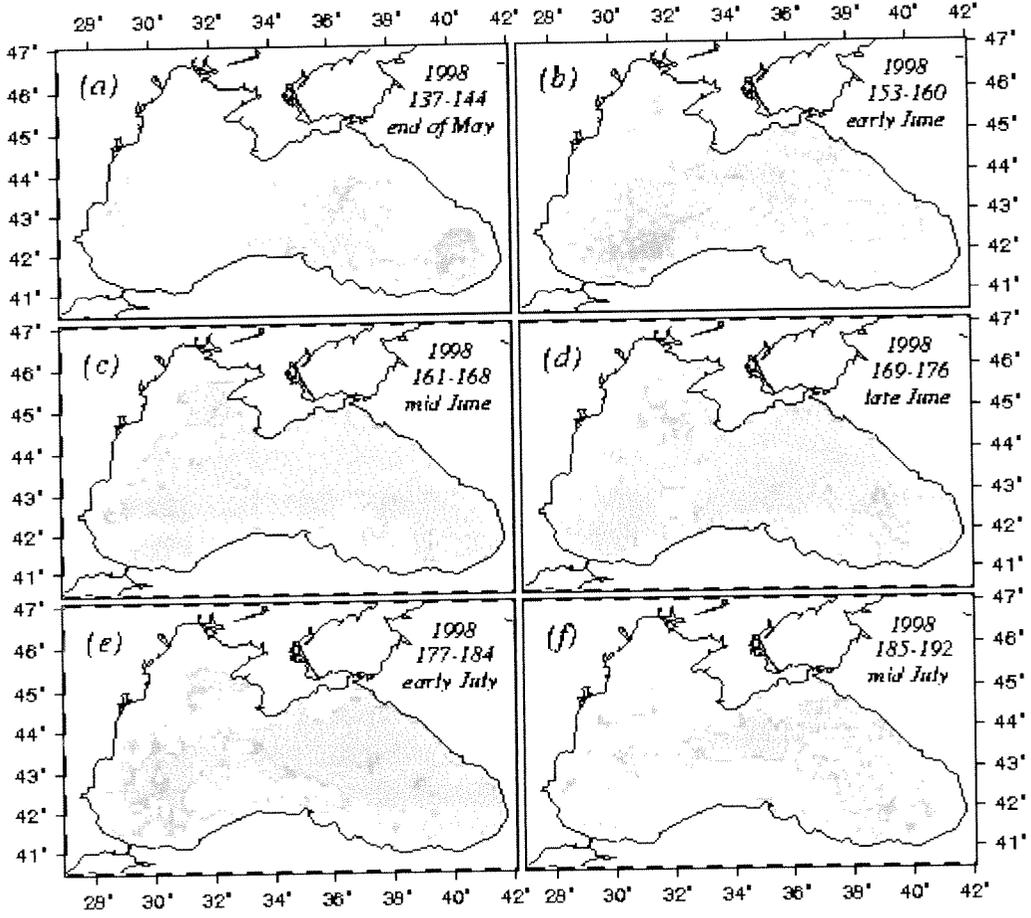


Şekil 3.11 1998 yılında Erdemli aerosollerinde ölçülen MSA (siyah çizgiler) ve Al (kırmızı çizgiler) derişimlerinin bahar ve yaz aylarındaki dağılımı. Günlük yağış miktarı noktali barlar ile gösterilmiştir. Erdemli istasyonunun Karadeniz üzerinden kaynaklanan hava kütlelerinden etkilendiği dönemler kesikli çizgi ile gösterilen barlar ile tanımlanmıştır.

Şekil 3.11’de 1998 yılında Erdemli’de toplanan aerosol örneklerinde gerçekleştirilen metan sülfonat (MSA), alimünyum (Al) derişimlerinin bahar ve yaz aylarındaki değişimi ile birlikte Erdemli’ye düşen günlük yağış miktarı sunulmuştur.

Bahar aylarında MSA ve Al derişimlerinde ani yükselmeler gözlenmiştir. Erdemli istasyonunda bahar aylarında toplanan aerosol ve yağış numunelerinde gözlenen Al derişimlerindeki ani artışların istasyon bölgesine ulaşan hava kütlelerinin geri yörüngeleri ile bütünleşik olarak değerlendirilmesi sonucunda bölge atmosferine episodik olarak taşınan çöl tozlarından kaynaklandığı kanıtlanmıştır (Kubilay ve diğ., 2000; Özsoy ve Saydam, 2000; 2001). Şekil 3.11’de bahar aylarında gözlenen MSA derişimindeki ani yükselmeler, yağmurlar ile yıkanarak deniz yüzeyine çökelen çöl tozlarının deniz ortamındaki biyolojik aktiviteyi arttırmasına bağlanmıştır.

Yaz aylarındaki yüksek MSA derişimleri ise Karadeniz üzerinden taşınan hava kütleleri ve bu denizin tüm yüzeyini kaplayan kokolit türü fitoplankton patlamaları ile ilişkilendirilmiştir. Karadeniz’de yaz aylarında rutin olarak kokolit patlamaları olduğu SeaWIFS verileri kullanılarak uzaktan algılama metodu ile bu araştırma projesi çerçevesinde gösterilmiştir (Çokacar ve diğ., 2001). 1998 yılına ait Mayıs-Temmuz ayları arasındaki kokolit patlamaları Çokacar ve diğ. (2001)’nin kullandıkları algoritma ile proses edilmiş olan SeaWIFS verileri ile gösterilmiştir (bkz Şekil 3.12). Uzaktan algılama verileri ile bu dönemde tüm Karadeniz baseninin kokolit türü fitoplankton patlamalarına maruz olduğu kanıtlanmıştır. Bu tür organizmalar yoğun olarak DMS üretmeleri nedeni ile Karadeniz üzerindeki atmosferde DMS ve MSA derişimlerinin yüksek olması beklenir. Sonuç olarak, yaz aylarında Erdemli istasyonunda gözlenen yüksek MSA derişimlerinin bu dönemde Karadeniz’de basen ölçeğinde patlama yapan kokolitlerin ürettiği DMS’in Karadeniz üzerinden kaynaklanarak Erdemli istasyonuna ulaşan hava kütleleri ile taşındığı şeklinde yorumlanmıştır. Bu konu ile ilgili daha detaylı bilgi Kubilay ve diğ., (2002)’ne ait yayında verilmiştir.

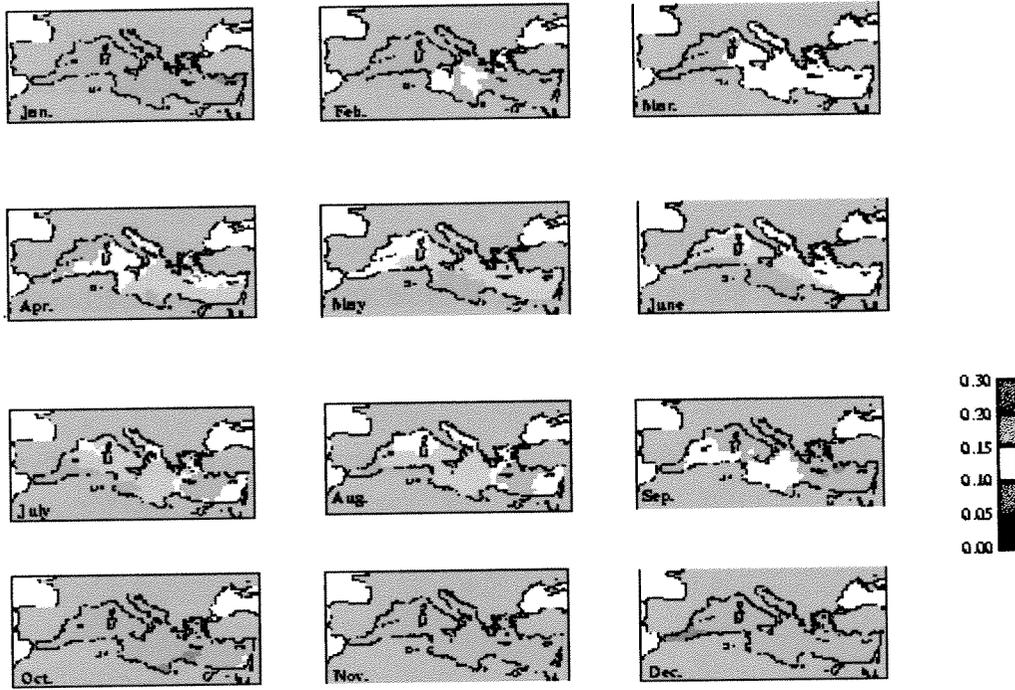


Şekil 3.12. Mayıs-Temmuz 1998 dönemine ait SeaWIFS sensörünün 8 günlük komposit verilerinden türetilen Karadeniz'in yüzey sularındaki kokolit dağılımı. (a) Mayıs sonu; (b) Haziran başı; (c) Haziran ortası; (d) Haziran sonu; (e) Temmuz başı; (f) Temmuz ortası. Haritalar üzerinde siyah renk ile boyanan bölgeler kokolit patlamalarının olduğu alanları, gri renkli bölgeler kokolit patlamalarının olmadığı alanları ve beyaz renkli bölgeler ise bulut ile kaplı alanları tanımlamaktadır.

4. TARTIŞMA

Sonuçlar ana başlığı altında sunduğumuz birinci alt başlık SeaWIFS verileri ile türetilen Akdeniz'in biyo-optik özellikleridir. Günümüzde okyanus rengini algılama özelliğine sahip bir kaç sensörden biri olan SeaWIFS'in verileri ile okyanusların ve üzerlerindeki atmosferin biyo-optik özelliklerinin geniş uzay ve zaman ölçeğinde elde edilmesi mümkündür. Akdeniz havzası için klimatolojik ölçekte türetilen bilgiler klorofil, aerosollerin optik kalınlığı ve

angstrom katsayısıdır. Bu bölümde bahsi geçen parametrelerin mevsimsel dağılımı sunulmuştur. Böylesi bir veri setinin yer ölçümleri ile elde edilmesi mümkün değildir. Şekil 3.1’de sunulmuş olan SeaWIFS verilerinden türetilmiş aerosollerin optik kalınlığı atmosfer kolonundaki aerosol kompozisyonunu oluşturan tüm bileşenlere aittir. SeaWIFS’in standart algoritması ile türetilen bu parametrenin, aerosol kompozisyonunu oluşturan tek bir bileşen için türetilmesi mümkün değildir. Moulin ve diğ. (1998) METEOSAT verilerini kullanarak sadece çöl tozlarına ait optik kalınlığın Akdeniz üzerindeki mevsimsel dağılımını türetmişlerdir (Şekil 4.1).



Şekil 4.1. METEOSAT uydusu verilerinden türetilen çöl tozlarına ait optik kalınlığın Akdeniz baseni üzerindeki mevsimsel dağılımı (Moulin ve diğ., 1998’den alınmıştır).

Şekil 3.1 de sunulan SeaWIFS verilerinden türetilmiş olan aerosollerin optik kalınlığının mevsimsel dağılımının Şekil 4.1’de sunulan çöl tozlarının optik kalınlığının dağılımı ile uyumlu olması Akdeniz atmosferinde baskın olarak bulunan aerosol türünün çöl tozu olduğuna işaret etmektedir.

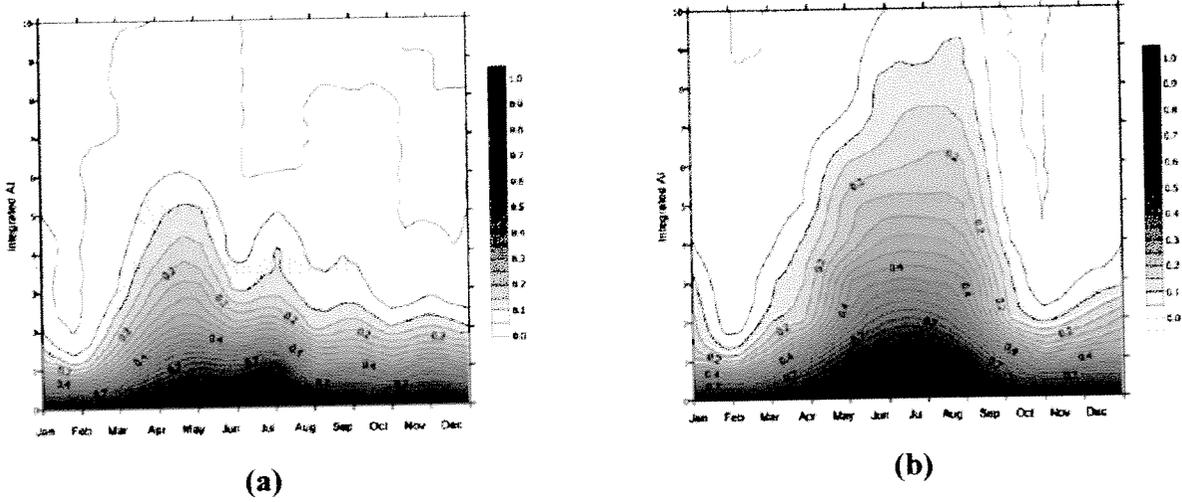
Şekil 3.2’de sunulmuş olan SeaWIFS verilerinden türetilmiş olan angstrom katsayısı atmosfer kolonunda bulunan aerosollerin parçacık boyutunu ve buna bağlı olarak aerosollerin

kaynağını belirlemektedir. Deniz atmosferinde bulunan aerosoller doğal, antropojenik ve biyojenik olmak üzere üç farklı kaynaktan atmosfere yayılmaktadır. Doğal kaynaklı aerosoller büyük parçacık boyutuna sahip olup rüzgar etkisi ile havalanan toprak parçacıkları ve deniz tuzudur. Antropojenik kaynaklar ise fosil yakıtların kullanılması ile atmosfere yayılan sülfür dioksit ve azot oksit gazlarıdır. Biyojenik kaynak ise denizsel biyolojik aktivite ile atmosfere yayılan dimetilsülfid (DMS) gazıdır. Antropojenik ve biyojenik aktiviteler ile atmosfere salınan bu gazlar atmosferde fotokimyasal süreçlerden geçerek sülfat, metansulfonat (MSA) ve nitrat aerosollerini oluştururlar. Bu tür aerosollerin parçacık boyutu genel olarak doğal kaynaklardan atmosfere yayılan aerosollerin parçacık boyutundan küçüktür. Angstrom katsayısı ile aerosollerin parçacık boyutu arasında ters bir ilişki vardır. Küçük parçacık boyutuna sahip aerosoller yüksek angstrom katsayısına, büyük parçacık boyutuna sahip aerosoller ise düşük angstrom katsayısına sahiptir.

Şekil 3.3’de sunulmuş olan SeaWIFS verilerinden türetilmiş klorofil dağılımı tüm Akdeniz basenindeki fitoplankton biyokütlesinin zamana bağımlı değişimini göstermektedir. Akdeniz’in batıdan doğuya doğru azalan bir klorofil dağılımı olduğu ve doğunun daha oligotropik bir yapıya sahip olduğu görülmektedir. Bu verilerin Doğu ve Batı Akdeniz’de gerçekleştirilen klorofil ölçümleri ile karşılaştırılması sonucunda uzaktan algılama metodu ile Akdeniz için türetilen klorofil değerlerinin özellikle düşük klorofil derişimleri için gerçek değerlerinden yüksek türetildiği daha önce gösterilmiştir (Bricaud ve diğ., 2002).

Uydulardan elde edilen ham verilerin Bölüm 3.1’de sunulan türde bilgilere dönüştürülmesi için belirli algoritmalar ile işlenmesi gerekmektedir. SeaWIFS’in standart algoritmaları global ölçek için dizayn edildiğinden deniz ve atmosferin biyo-optik özelliklerindeki bölgesel farklılaşmayı içermemektedir. Dolayısı ile Akdeniz gibi iç denizler için standart algoritmalar ile türetilen parametrelerin yer ölçümleri ile hassas bir biçimde doğrulanması gerekmektedir. Bu tür bir karşılaştırma Sonuçlar bölümünün ikinci alt başlığı altında anlatılmıştır. Aerosollerin ölçülen optik kalınlığının ≤ 0.2 değerleri arasında olduğu dönemlerde SeaWIFS verileri ile türetilen optik kalınlık değerlerinin ölçümler ile uyumlu olduğu görülmüştür. Ancak ölçülen optik kalınlık değerlerinin > 0.2 ’den büyük olduğu günler için SeaWIFS verileri ile aerosollerin optik kalınlığı değerleri türetilenmemiştir. Bu durum özellikle karşılaştırmanın yapıldığı 2000 yılının Nisan ayında gözlenmiştir (bkz. Şekil 3.5a). Israelevich ve diğ., (2002)’nin uzaktan algılama metodu ile elde ettikleri sonuçlar çöl tozunun

Akdeniz'in doğusunda en fazla Nisan ayında batısında ise Temmuz ayında gözlemlendiğini göstermiştir (Şekil 4.2). Bu durum daha önce Moulin ve diğ. (1998)'nin elde ettiği ve Şekil 4.1'de sunulan sonuçlar ile uyumludur. Dolayısı ile Nisan aylarında Doğu Akdeniz atmosferinde bulunan aerosollerin baskın bileşeninin Afrika'dan taşınan çöl tozları olduğunu söylemek mümkündür. Bu tozların yoğun miktarlarda doğu Akdeniz atmosferine taşındığı dönemlerde SeaWIFS'in standart atmosferik temizleme algoritması aerosollerin optik kalınlığı bilgisini türetememektedir (bknz. Şekil 3.5a).

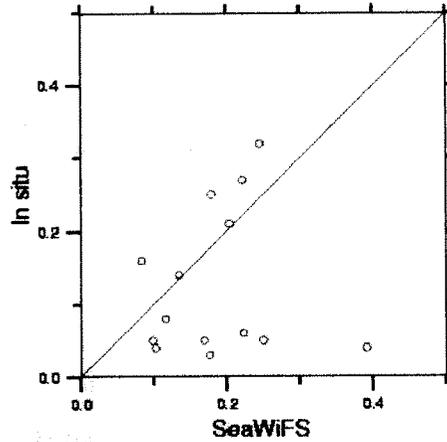


Şekil 4.2. Akdeniz atmosferinde çöl tozunun bulunma ihtimalini gösteren fonksiyonun mevsimsel dağılımı (Israelevich ve diğ., 2002'den alınmıştır).

(a) Doğu Akdeniz; (b) Batı Akdeniz

2000 yılında ölçülen klorofil değerleri $0.05-0.1 \text{ mg m}^{-3}$ aralığında değiştiği dönemlerde SeaWIFS ile türetilen derişimlerin 0.2 mg m^{-3} civarında olduğu gözlenmiştir (bknz. Şekil 3.5b). Klorofil ölçümü gerçekleştirilen günlere denk düşen SeaWIFS'in standart algoritması ile türetilen klorofil derişimlerinin birebir karşılaştırılması Şekil 4.3'de sunulmuştur. Bu karşılaştırma sonucunda SeaWIFS'in standart algoritmasının çok düşük klorofil derişimlerinde gerçek değerinden 5 kat daha fazla klorofil türettiği görülmüştür. Ölçülen klorofil derişimlerinin $\geq 0.2 \text{ mg m}^{-3}$ mertebesinde olduğu durumlarda ise SeaWIFS ile türetilen klorofil derişimleri ile $\pm \% 35$ gibi farklılıklar görülmektedir.

SeaWiFS'in standart biyo-optik algoritması ile türetilen değerler ölçülen klorofil değerlerinin \pm % 35' i olduğu durumlar için algoritmanın test edilen bölge için güvenilir olduğu kabul edilmektedir (D'Ortenzio ve diğ. 2002).

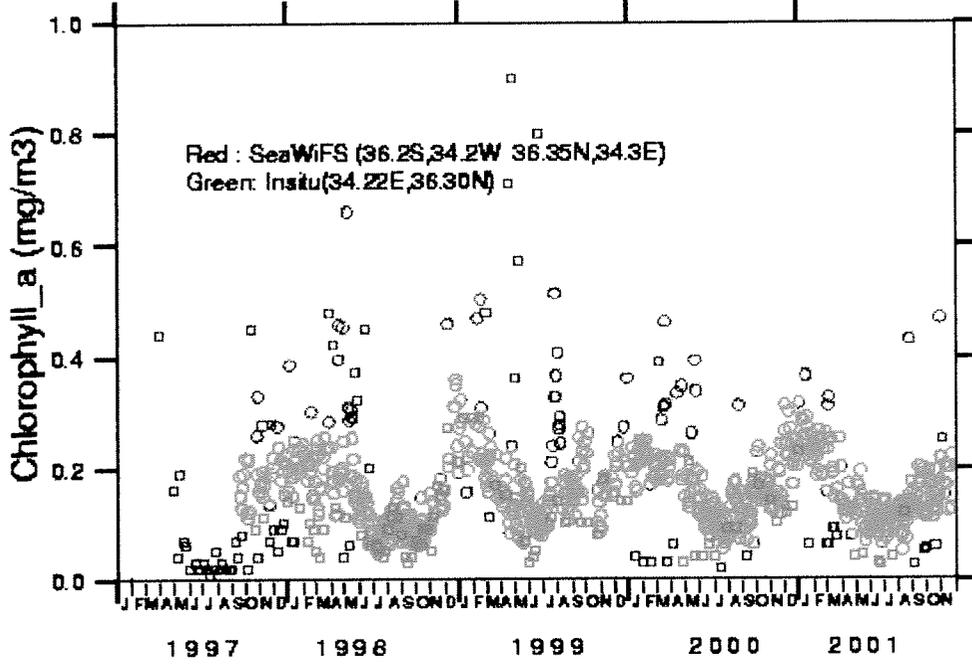


Şekil 4.3. 2000 yılında ölçülen klorofil derişimlerinin SeaWiFS ile türetilen klorofil derişimleri ile karşılaştırılması.

Akdeniz'de gözlenen düşük klorofil derişimlerinin, SeaWiFS ve diğ er benzeri sensörlerden türetilen klorofil değerleri ile uyumsuzluğu daha önceki araştırmalar çerçevesinde gösterilmiştir. Bu araştırmacıların elde ettikleri sonuçlar, uyumsuzluğun kullanılan atmosferik temizleme ve biyo-optik algoritmalarının içerisinde Akdeniz'in ve atmosferinin kendine has özelliklerinin tanımlanmamış olmasından kaynaklandığını ve bölgesel algoritmaların geliştirilmesinin gereğini ortaya koymuştur. Ayrıca Akdeniz atmosferine taşınan ve deniz yüzeyine çöken Afrika tozlarının gösterilen uyumsuzluk üzerindeki katkısına dikkat çekilmiştir (D'Ortenzio ve diğ., 2002; Bricaud ve diğ., 2002; Gitelson ve diğ., 1996; Claustre ve diğ., 2002).

Şekil 4.4'de Erdemli açıklarında (bkz. Şekil 3.4) tekne ile alınan su numunelerinde ölçülen klorofil derişimlerinin SeaWiFS'in standart algoritması ile türetilen klorofil derişimleri ile zaman serisi karşılaştırılması sunulmuştur. SeaWiFS verilerinden türetilen klorofil değerlerinin ölçümlerle gözlenen mevsimsel değişimi takip ettiği görülmektedir. Genel olarak, klorofil değerleri Kasım-Nisan ayları arasında yüksek derişimlerde Mayıs-Eylül ayları arasında ise düşük derişimlerde gözlenmiştir. Gözlenen ve türetilen derişimler arasındaki

farklılık SeaWIFS'in standart algoritmasının doğu Akdeniz'in biyo-optik özelliklerini içermemesinden kaynaklanmaktadır.



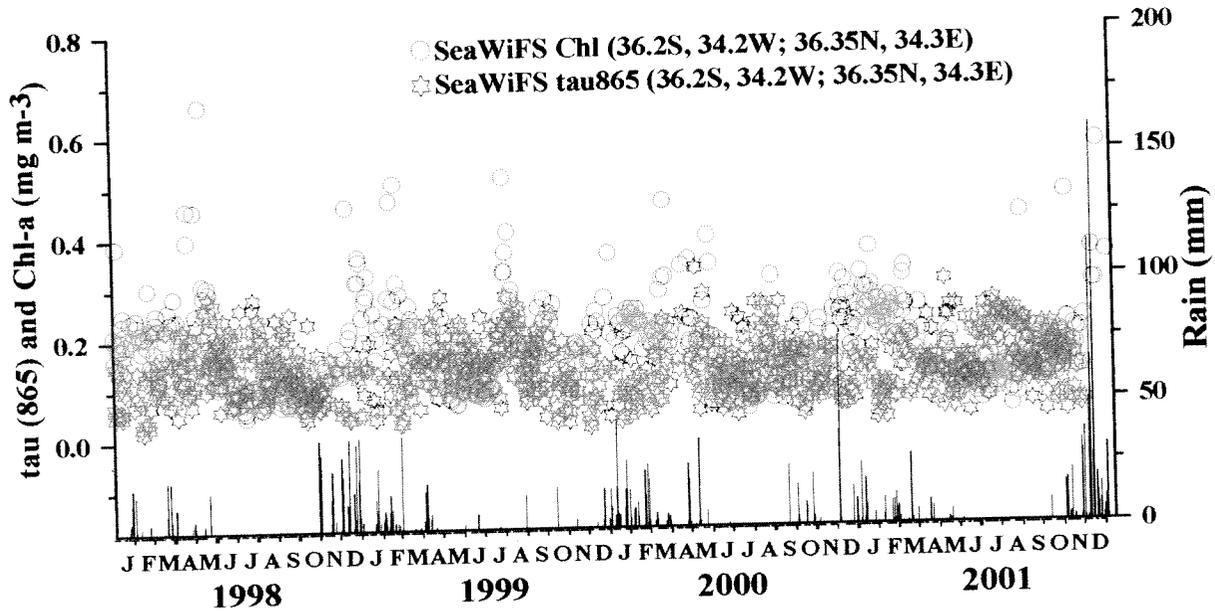
Şekil 4.4. Zaman serisi klorofil ölçümlerinin SeaWIFS'in standart algoritması ile türetilen klorofil derişimleri ile karşılaştırılması (kırmızı renk SeaWIFS , yeşil renk ise ölçülen klorofil derişimlerine aittir).

Sonuçlar bölümünün üçüncü alt başlığı Akdeniz atmosferinde çöl tozlarının bulunduğu durumlarda SeaWIFS sensörü verileri ile türetilen biyo-optik parametrelerdir. Bu bölümde doğu Akdeniz atmosferinde yoğun olarak çöl tozu bulunduğu örnekler seçilerek SeaWIFS'in atmosferik temizleme ve biyo-optik algoritmalarının bu durumlarda gerçekçi sonuçlar vermediği gösterilmiştir. Bu araştırma çerçevesinde kullanılan SMA algoritmasının doğu Akdeniz atmosferinde çöl tozu bulunduğu durumlar için standart algoritmalara nisbeten daha gerçekçi sonuçlar üretebildiği ortaya konmuştur. Ancak doğu Akdeniz atmosferine farklı kaynaklardan (Afrika ve Arap Yarımadası) çöl tozu taşıyor olması ve bu tozların optik karakteristiklerinin farklı olması nedeni ile SMA algoritmasının istenilen doğrulukta sonuçlar üretilmediği tahmin edilmektedir. Bu konu farklı kaynaklardan Akdeniz üzerine taşınan çöl tozlarının optik özellikleri belirlenerek SMA algoritması içerisinde tanımlanması ile aydınlatılacaktır. Bu araştırma projesi içerisinde başlattığımız bu yöndeki çalışmalar, proje

araştırmacıları kadrosunda yer alan Tülay okacar tarafından doktora çalışması kapsamında devam ettirilmektedir.

Sonuçlar bölümünün son alt başlığı Deniz atmosfer etkileşiminin gösterilmesi amacı ile uzaktan algılama metodunun kullanılmasıdır. Bu bölümde ölçüm ve uzaktan algılama verileri kullanarak denizsel biyolojik aktivitenin doğu Akdeniz atmosferindeki aerosol kompozisyonuna katkısı gösterilmiştir. Ayrıca bahar aylarında gözlenen metanslfonat değerlerindeki ani yükselmeler çöl tozlarının yağmurlar ile deniz yüzeyine çökerek biyolojik aktiviteyi arttırması biçiminde yorumlanmıştır.

şekil 4.5'te Erdemli açıklarında SeaWIFS'in standart algoritması ile türetilen klorofil derişimi ve aerosollerin optik kalınlığı değerleri uzun dönemli (1998-2001) karşılaştırılmıştır. Yağışlı dönemlerde yıkanarak deniz yüzeyine çökmesi sonucunda atmosferdeki aerosol miktarı düşük seviyelerde gözlenirken bu dönemlerde klorofil derişimleri artmıştır.



şekil 4.5. SeaWIFS'in standart algoritması ile türetilen aerosollerin optik kalınlığı (siyah yıldız) ve klorofil derişimlerinin (kırmızı daire) zaman serisi karşılaştırılması. Günlük yağış miktarları bar ile gösterilmiştir.

Doğu Akdeniz baseni için uydu verileri ile türetilen klorofil ve atmosferdeki çöl tozu miktarının zaman serisi karşılaştırılması bu her iki parametre arasında ters bir ilişki olduğunu göstermiştir (Ziveri ve diğ., 2000). Yağışlı dönemlerde atmosferdeki çöl tozu miktarının

azaldığı ve yüzey sularındaki klorofil derişimlerinin arttığı gözlenirken kurak dönemlerde ise atmosferdeki çöl tozu miktarının arttığı ve klorofil derişimlerinin azaldığı gözlenmiştir. Bu gözlemlere dayanarak yağışlarla deniz yüzeyine çöken çöl tozlarının ortamdaki besin tuzlarının (fosfat) miktarını arttırarak kokolit türlerinin patlama yapmasına elverişli koşulların oluştuğu belirtilmiştir. Şekil 4.5'te gözlenen durum Ziveri ve diğ. (2000) çöl tozlarının doğu Akdeniz'deki birincil üretime olası katkısı üzerine yaptıkları açıklamanın Erdemli açıklarında da geçerli olabileceğine dair ipucu vermektedir.

Burada sonuç raporu sunulan araştırma projesi TÜBİTAK ile CNRS (Centre National de la Recherche Scientifique) arasındaki bilimsel ve teknik işbirliği kapsamında ortaklaşa yürütmek üzere adı geçen her iki kurumca desteklenmiştir. Projenin başarı ölçütleri ortak çalışılacak olan Fransız araştırma grubunun genelde "uzaktan algılama" ve özelde "Çöl tozlarının uzaktan algılanması" konularındaki bilgi ve tecrübelerinin ODTÜ-Deniz Bilimleri Enstitüsü'ne aktarılması olarak belirlenmiştir.

Projenin Araştırmacı kadrosunda yer alan Araştırma Görevlisi Tülay Çokacar uzaktan algılama konusunda yeterli deneyim kazanmış ve doktora çalışmasını bu yönde halen devam ettirmektedir. Proje süresince elde edilen veriler kullanılarak iki ayrı yayın yapılmış ve TÜBİTAK ın projeye yapmış oldukları katkıya yayınların teşekkür bölümünde yer verilmiştir. Ayrıca proje kapsamında elde edilen sonuçlar 2002 yılında Girit'de düzenlenmiş olan "Atmospheric Chemistry within Earth System" konu başlıklı uluslararası konferansta poster olarak sunulmuştur (bkz EK1).

5. ÖNERİLER

Bu araştırma projesi kapsamında elde edilen sonuçlar SeaWIFS verilerini proses ederek bilgiye dönüştüren standart algoritmaların doğu Akdeniz atmosferinde yoğun miktarda çöl tozu bulunduğu durumlarda başarılı sonuçlar üretemediğini göstermiştir. Bu sonuç bölgeye has optik özellikleri içeren algoritmaların türetilmesinin gereğini ortaya çıkarmıştır. Böylesi bir algoritmanın türetilmesi için hem laboratuvar ve hemde saha çalışmalarının yapılması gerekmektedir. Bu amaçla deniz ve atmosferin optik özelliklerinin ve klorofil ölçümlerinin SeaWIFS ölçümleri ile eş zamanlı gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Elde edilecek olan biyo-optik ölçümler ile bölgesel bir algoritmanın geliştirilmesi mümkün olacaktır.

6. REFERANSLAR

- ANTOINE, D., Morel, A. and Andre, J-M., Algal pigment distribution and primary production in the eastern Mediterranean as derived from coastal zone color scanner observations, *J. Geophys. Res.*, 100, 16193-16209, (1995).
- BERGAMETTI, G., Remoudaki, E., Losno, R., Steiner, E., Chatenet, B. and Buat-Menard, P., Source, transport and deposition of atmospheric phosphorus over the Northwestern Mediterranean, *J. Atmos. Chem.*, 14, 501-513, (1992).
- BRICAUD, A., Bosc, E. and Antoine, D, Algal biomass and sea surface temperature in the Mediterranean basin: Intercomparison of data from various satellite sensors, and implications for primary production estimates, *Remote Sensing of Environment*, 81, 163-178, (2002).
- CHARLSON, R. J., Lovelock, J. E., Andreae, M. O. and Warren, S. G., Oceanic phytoplankton, atmospheric sulphur, cloud albedo and climate, *Nature*, 326, 655-661, (1987).
- CHARLSON, R. J., Schwartz, S. E., Hales, J. M., Cess, R. D., Coakley, J. A., Hansen, J. E. and Hofman, D. J., Climate forcing by anthropogenic aerosols, *Science*, 255, 423-430, (1992).
- CLAUSTRE, H., Morel, A., Hooker, S. B., Babin, M., Antoine, D., Oulbelkheir, K., Bricaud, A., Leblanc, K., Queguiner, B. and Maritorena, S., Is desert dust making oligotrophic waters greener?, *Geophys. Res. Lett.*, 29 (10), 10.1029/2001GL014056, (2002).
- COALE ve diğ., A massive phytoplankton bloom induced by an ecosystem-scale iron fertilization experiment in the equatorial Pacific Ocean, *Nature*, 383, 485-501, (1996).
- ÇOKACAR, T., Kubilay, N., and Oguz, T., Structure of *Emiliania huxleyi* blooms in the Black Sea surface waters as detected by SeaWiFS imagery, *Geophys. Res. Lett.*, 28 (24), 4607-4610, (2001).
- D'ORTENZIO, F., Marullo, S., Ragni, M., d'Alcala, M. R. and Santoleri, R., Validation of empirical SeaWiFS algorithms for chlorophyll-a retrieval in the Mediterranean Sea: A case study for oligotrophic seas, *Remote Sensing of Environment*, 82, 79-94, (2002).
- DUCE, R.A., Liss, P.S., Merrill, J.T., Atlas, E.L., Buat-Menart, P., Hicks, B.B., Miller, J.M., Prospero, J.M., Arimoto, R., Church, T.M., Ellis, W., Galloway, J.N., Hansen, L., Jickells, T.D., Knap, A.H., Reinhardt, K.H., Schneider, B., Soudine, A., Tokos, J.J., Tsunogai, S., Wollast, R. and Zhou, M., The atmospheric input of trace species to the world ocean, *Global Biogeochem. Cycles*, 5: 193-259, (1991).
- FUNG, I. Y., Meyn, S. K., Tegen, I., Doney, S. C., John, J. G. and Bishop, J. K. B., Iron supply and demand in the upper ocean, *Global Biogeochem. Cycles.*, 14 (1), 281-295, (2000).

- GABRIC, A. J., Cropp, R., Ayers, G. P., McTainsh, G. and Braddock, R., Coupling between cycles of phytoplankton biomass and aerosol optical depth as derived from SeaWiFS time series in the subantarctic ocean, *Geophys. Res. Lett.*, 29 (7), 10.1029/2001GL013545, (2002).
- GAO, Y., Kaufman, Y.J., Tanre, D., Kolber, D. and Falkowski, P. G., Seasonal distributions of aeolian iron fluxes to the global ocean, *Geophys. Res. Lett.*, 28 (1), 29-32, (2001).
- GITELSON, A., Karnieli, A., Goldman, N., Yacobi, Y. Z. and Mayo, M., Chlorophyll estimation in the southeastern Mediterranean using CZCS images: adaptation of an algorithm and its validation, *J. Mar. Syst.*, 9, 283-290, (1996).
- GORDON, H. R. and Wang, M., Retrieval of water-leaving radiance and aerosol optical thickness over the oceans with SeaWiFS: a preliminary algorithm, *Applied Optics*, 33 (3), 443-452, (1994).
- GORDON, H. R., Du, T. and Zhang, T., Remote sensing of ocean color and aerosol properties: resolving the issue of aerosol absorption, *Applied Optics*, 36 (33), 8670-8684, (1997).
- GRIFFIN, D. W., Garrison, V. H., Herman, J. R. and Shinn, E. A., African desert dust in the Caribbean atmosphere: Microbiology and public health, *Aerobiologia*, 17, 203-213, (2001a).
- GRIFFIN, D. W., Kellogg, C. A. and Shinn, E. A., Dust in the wind: Long-range transport of dust in the atmosphere and its implications for global public and ecosystem health, *Global Change & Human Health*, 2, 1, 20-33, (2001b).
- GRIFFIN, D. W., Kellogg, C. A., Garrison, V. H. and Shinn, E. A., The global transport of dust, *American Scientist*, 90, 227-235, (2002).
- GUERZONI, S., Chester, R., Dulac, F., Herut, B., Loyer-Pilot, M-D., Measures, C., Migon, C., Molinaroli, E., Moulin, C., Saydam, C., Soudine, A. and Ziveri, P., The role of atmospheric deposition in the biogeochemistry of the Mediterranean Sea, *Progress in Oceanography*, 44: 147-190, (1999).
- GUIEU, C., Loyer-Pilot, M-D, Ridame, C., and Thomas, C., Chemical characterization of the Saharan dust end-member: some biogeochemical implications for the western Mediterranean Sea, *J. Geophys. Res.*, 107 (D15), 10.1029/2001JD000582, (2002a).
- GUIEU, C., Bozec, Y., Blain, S., Ridame, C., Sarthou, G. and Leblond N., Impact of high Saharan dust inputs on dissolved iron concentrations in the Mediterranean Sea, *Geophys. Res. Lett.*, 29(19), 1911, doi:10.1029/2001GL014454, (2002b).

- HERMAN, J.R. P.K. Bhartia, O.Torres, C. Hsu, C. Seftor, E. Celarier, Global Distribution of UV-Absorbing Aerosols From Nimbus-7/TOMS Data , *J.Geophys. Res.*, 102, 16,911-16,922, (1997).
- HERUT, B., Collier, R. and Krom, M. D., The role of dust in supplying nitrogen and phosphorus to the southeast Mediterranean, *Limnol. Oceanogr.*, 47(3), 870-878, (2002).
- HUSAR, R. B., J. M. Prospero and L. W. Stowe, Characterization of tropospheric aerosols over the oceans with the NOAA advanced very high resolution radiometer optical thickness operational product. *J. Geophys. Res.*, 102, 16889-16909, (1997).
- HUTCHINS , D. A. and K. W. Bruland, Iron-limited diatom growth and Si:N uptake ratios in a coastal upwelling regime, *Nature*, 393, 561-564, (1998).
- IOCCG REPORT NUMBER 1, Minimum requirements for an operational Ocean-Colour sensor for the open ocean, Reports of the International Ocean-Colour Coordinating Group, p. 46, (1998).
- IOCCG REPORT NUMBER 2, Status and plans for satellite ocean-colour missions: considerations for complementary missions, ,Reports of the International Ocean-Colour Coordinating Group, p. 43, (1999).
- ISRAELEVICH, P. L., Levin, Z., Joseph, J. H. and Ganor, E., Desert aerosol transport in the Mediterranean regions as inferred from the TOMS aerosol index, *J.Geophys. Res.*, 107, 4572, doi:10.1029/2001JD002011, (2002).
- JICKELLS, T., Atmospheric inputs of metals and nutrients to the oceans: their magnitude and effects, *Mar. Chem.*, 48: 199-214, (1995).
- JICKELLS, T. D., The inputs of dust derived elements to the Sargasso Sea; a synthesis, *Mar. Chem.*, 68: 5-14, (1999).
- KUBILAY, N., S. Nickovic, C. Moulin and F. Dulac, An illustration of the transport of mineral dust onto the eastern Mediterranean, *Atmos. Environ.*, 34/8: 1293-1303, (2000).
- KUBILAY, N., Koçak, M., Çokacar, T., Oguz, T., Kouvarakis, G. and Mihalopoulos, N., Influence of Black Sea and local biogenic activity on the seasonal variation of aerosol sulfur species in the eastern Mediterranean, *Global Biogeochem. Cycles*, 16(4), 1079, doi:10.1029/2002GB001880, (2002).
- LENES, J. M., Darrow, B. P., Cattrall, C., Heil, C. A., Callahan, M., Vargo, G. A., Byrne, R. H., Prospero, J. M., Bates, D. E., Fanning, K. A., Walsh, J. J., Iron fertilization and the *Trichodesmium* response on the west Florida shelf, *Limnol., Oceanogr.* 46(6), 1261-1277, (2001).

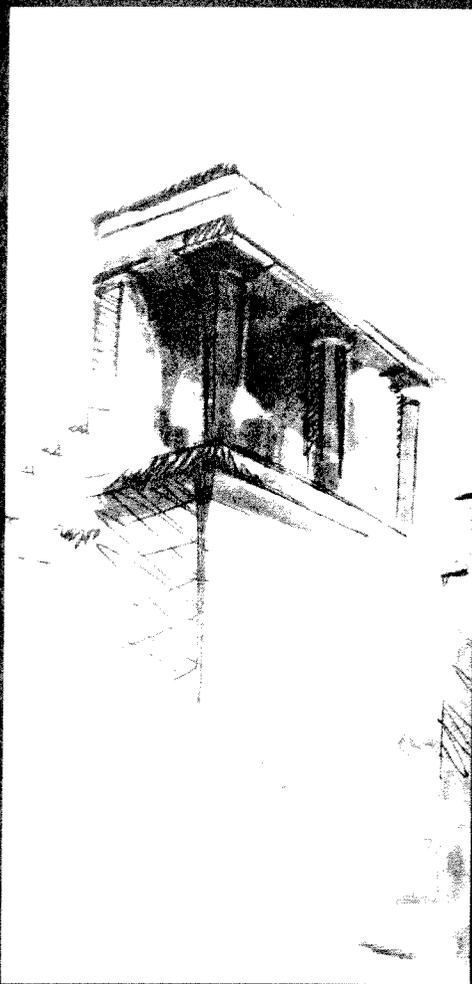
- MIGON, C. and Sandroni, V., Phosphorus in rainwater: Partitioning inputs and impact on the surface coastal ocean, *Limnol. Oceanogr.*, 44: 1160-1165, (1999).
- MOULIN, C., E. Lambert, U. Dayan, V. Masson, M. Ramonet, P. Bousquet, M. Legrand, Y. J. Balkanski, W. Guelle, B. Marticorena, G. Bergametti and F. Dulac, Satellite climatology of African dust transport in the Mediterranean atmosphere, *J. Geophys. Res.* 103, 13137-13144, (1998).
- MOULIN, C., H. R. Gordon, V. F. Banzon and R. H. Evans, Assessment of Saharan dust absorption in the visible from SeaWiFS imagery, *J. Geophys. Res.*, 106, 18239-18249, (2001a).
- MOULIN, C., H. R. Gordon, R. M. Chomko, V. F. Banzon and R. H. Evans., Atmospheric correction of ocean color imagery through thick layers of Saharan dust, *Geophys. Res. Lett.*, 28, 5-8, (2001b).
- O'REILLY, J. E., Maritorena, S., Mitchell, B. G., Siegel, D. A., Carder, K.L., Garver, S. A., Kahru, M. and McClain, C., Ocean color chlorophyll algorithms for SeaWiFS, *J. Geophys. Res.*, 103, 24937-24953, (1998).
- ÖZSOY, T. and Saydam C., Acidic and alkaline precipitation in the Cilician basin, north eastern Mediterranean Sea, *The Science of the Total Environment*, 253, 93-109, (2000).
- ÖZSOY, T. and Saydam, C., Iron speciation in precipitation in the north-eastern Mediterranean and its relationship with Sahara dust, *Journal of Atmospheric Chemistry*, 40, 41-76, (2001).
- RIDAME, C. and Guieu, C., Saharan input of phosphate to the oligotrophic water of the open western Mediterranean Sea, *Limnol. Oceanogr.*, 47(3), 856-869, (2002).
- SAYDAM, A. C., Can we predict harmful algae blooms. *Harmful Algae News*, 15, 5-6, (1996).
- SAYDAM, A. C. and Senyuva, H. Z., Deserts: can they be the potential suppliers of bioavailable iron?, *Geophys. Res. Lett.*, 29 (10), 10.1029/2001GL013562, (2002).
- SARTHOU, G. and Jeandel, C., Seasonal variation of iron concentrations in the Ligurian Sea and iron budget in the Western Mediterranean Sea, *Mar. Chem.*, 74, 115-129, (2001).
- SCHWINDLING, M., Deschamps, P. and Frouin, R., Verification of aerosol models for satellite ocean color remote sensing, *J. Geophys. Res.*, 103, 24919-24935, (1998).
- SHINN, E. A., Smith, G. W., Prospero, J. M., Betzer, P., Hayes, M. L., Garrison, V. and Barber, R. T., African dust and demise of Caribbean coral reefs. *Geophysical Research Letters*, 27, 3029-3032, (2000).

EK1

Joint International Symposium on
**ATMOSPHERIC
CHEMISTRY**
WITHIN THE
EARTH SYSTEM:

FROM REGIONAL POLLUTION TO GLOBAL CHANGE

Program and Abstracts



16th Symposium
of the IAPAS
Commission on Atmospheric Chemistry
and Global Pollution
(CACGP)

7th Scientific Conference
of the International Global
Atmospheric Chemistry Project
(IGAC)

18-25 September 2002 Crata Maris, Hersonissos, Heraklion, Crete, GREECE

dust transport, we analyze the spatial distribution and seasonal variations of dust for these different regions and infer the latitudes of maximum dust occurrence. Inter-annual variations of dust is investigated in conjunction with annual variations of rainfall over the Sahel. This analysis shows that the TOMS mineral dust annual variability is better correlated to rainfall deficits of the previous year than with rainfall of the current year. Thus the TOMS satellite dust record confirms the impact of rainfall deficits over Sahel on dust long-term evolution as highlighted by previous studies based on limited ground observations [Prospero and Nees, 1986; N'Tchayi Mbourou *et al.*, 1997].

Overall these satellite records of year-to-year variability of African dust highlight the impact of two key meteorological factors: the NAO which controls the occurrence and intensity of the transport over the Atlantic during the winter season, and an additional impact of rainfall in the Sahel on the long-term evolution of annual dust production and transport.

Study of the Structure of the Lower Troposphere over an Urban Site using a Mobile Backscattering Lidar System

GIORGOS CHOURDAKIS, GEORGE GEORGOUSSIS, ANTONIS OIKONOMOU

ZENON SA - Lidar Group, Kanari 5, Glyka Nera, 153 54 Athens, Greece gchourdakis@zenon.gr

Laser remote-sensing techniques (lidar systems), have gained high acceptance as long-range non-invasive probes of the chemical composition and physical properties of the atmosphere. Through its high spatial and temporal resolution, the lidar technique is a powerful tool in monitoring the evolution of aerosol layers and in visualizing the structure and the dynamical processes of the Planetary Boundary Layer (PBL) using the aerosols as passive tracers.

In this paper we present the application of a mobile backscattering lidar system to retrieve information of the temporal and spatial variation of the aerosol layers and of the structure of the lower troposphere over a semi-urban site, outside the Greater Athens Area (GAA), Greece. The lidar system developed by ZENON S.A. is designed to perform continuous measurements of suspended aerosols particles in the PBL and the lower free troposphere. It is based on the second harmonic frequency of a compact Q-switched pulsed Nd:YAG laser, which emits pulses of 180 mJ at 532 nm. The optical receiver is a Cassegrainian reflecting telescope and the detector is operated in the analog and photon-counting modes. Typical values of the spatial and temporal resolution are 15 m and 1 minute, respectively. The scientific objectives addressed in this paper are the following: (i) study of the structure of the lower troposphere in an urban area. Two methods suited for precise determination of the planetary boundary-layer height (PBL) are presented. Comparisons made between radiosondes and lidar-derived PBL heights showed that the two techniques are in close agreement. The aerosol layer height is also determined in cases with high aerosol loading due to Sahara dust

transportation, (ii) study of the temporal variation of the vertical profile of the aerosol backscattering coefficient. Lidar observations during a day of intense photochemical pollution episode outside the GAA were carried out and the temporal evolution of the episode is presented. This work demonstrates that an automated, compact lidar system is a powerful tool for long-term monitoring of the aerosol layers and the structure of the troposphere.

Tropospheric CO, O₃ and CH₄ satellite measurements

C. CLERBAUX, J. HADJI-LAZARO, S. TURQUETY AND G. MÉGIE

Service d'Aéronomie, Institut Pierre-Simon Laplace, Univ. Paris 6, 4 Place Jussieu, 75252 Paris Cedex 05, France ccl@aero.jussieu.fr

Satellite data currently represent the majority of the observations available to improve our understanding of tropospheric chemistry. Nadir-viewing instruments probing the troposphere using the thermal IR emission of Earth were launched on board of polar-orbiting satellites (IMG/ADEOS, MOPITT/TERRA), and several other remote sensors are planned to be launched in the coming years (e.g. IASI/METOP, TES/AURA). From the atmospheric spectra recorded by FTS instruments, global scale information on atmospheric contents of CO, O₃, and CH₄ may be retrieved. In order to maximize the scientific return to be expected from these missions, efforts are being dedicated towards the development of fast forward radiative codes, efficient inversion methods for the retrieval of trace gases, and data assimilation techniques in chemical models.

This paper will present the results obtained from the analysis of atmospheric radiance spectra recorded by the IMG instrument. We will compare global fields of CO, O₃, and CH₄ measured for selected time periods with chemistry-transport model results, and discuss how future data could be used to constrain atmospheric models to improve our knowledge on distribution of ozone and its precursors.

Analysis of the change in mineral dust optical properties over the Eastern Mediterranean with source location using SEAWIFS imagery

TULAY ÇOKACAR¹, CYRIL MOULIN², AND NILGÜN KUBILAY¹

¹ Institute for Marine Sciences, Middle East Technical University, 33731 ICEL, Turkey, tulay@ims.metu.edu.tr

² Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement, CE Saclay, 91191 Gif-sur-Yvette, France

Mineral dust from surrounding arid regions is the major aerosol in the Mediterranean atmosphere during spring and summer. The Eastern Mediterranean is particularly interesting because mineral dust may come from two different sources, *i.e.*, Northern Africa and Middle East. These dust transports are intense and prevent most of

the time to retrieve phytoplankton concentration in surface waters from space (ocean color). Because of the dust absorption properties in the visible, its most striking effect on ocean color retrievals is to overestimate the phytoplankton concentration.

In this work, we used the method of *Moulin et al.* [2001] to estimate dust optical properties (including absorption) over the Eastern Mediterranean from SeaWiFS spectral measurements. We selected the most intense springtime and summertime dust events that occurred during the 1998-2000 period. For pixels with high optical thickness (> 1), we assumed that the marine contribution to the SeaWiFS measurement is negligible in the visible, so that the measured reflectance spectrum is solely due to aerosol and molecular scattering. After molecular scattering removal, we computed aerosol reflectances for various dust absorbing efficiencies until these modeled reflectances match the measured ones.

Dust optical properties over the Eastern Mediterranean can be separated in two main categories with different absorption efficiencies. By using the TOMS absorbing aerosol product to locate the dust sources, we found that mineral dust that comes from Middle East has lower absorption in blue and green parts of the solar spectrum than dust coming from Northern Africa. In addition, we found that the dust coming from Northern Africa over the Eastern Mediterranean has optical properties similar to that transported over the Atlantic. This new set of mineral dust optical properties will be used to improve ocean color estimates in the Eastern Mediterranean Sea.

Emission estimates and total tropospheric chlorine time series derived from 20+ years of ground-based measurements

D. M. CUNNOLD¹, R. G. PRINN², R. F. WEISS³, P. G. SIMMONDS⁴, P. J. FRASER⁵, L. W. PORTER⁶, R. L. LANGENFELDS⁵, S. O'DOHERTY⁴, B. R. MILLER³, AND A. MCCULLOCH⁴

¹School of Earth and Atmospheric Sciences, Georgia Institute of Technology, Atlanta, GA, cunnold@eas.gatech.edu

²Department of Earth, Atmospheric, and Planetary Sciences, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA ³Scripps Institution of Oceanography, University of California, San Diego, LaJolla, CA

⁴School of Chemistry, University of Bristol, Bristol, England, U.K. ⁵Atmospheric Research and Cooperative Research Centre for Southern Hemisphere

Meteorology, Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization, Aspendale, Victoria, Australia

⁶Cape Grim Baseline Air Pollution Monitoring Station, Smithton, Tasmania, Australia

Global atmospheric emissions of long-lived, radiatively active gases are estimated from continuous measurements at the GAGE/AGAGE surface sites and from measurements of the Australian archived air. It is shown that these data sources produce estimates, which are consistent with those derived from CMDL measurements, except for minor or absolute calibration

differences, and with the most recent, industry-based estimates. Of the anthropogenically produced long-lived gases, HCFC-22 measurements exhibit a latitudinal gradient, which is least consistent with model results constrained by the other measurements. Total tropospheric chlorine, including the HCFC contributions, is estimated and is shown to have decreased by approximately 185 ppt from 1992-2001. Recent indications of oceanic losses of CCl_4 make its budget the most difficult to simulate and hence makes CCl_4 future contributions to the chlorine budget the most difficult to predict.

Upper Stratospheric Ozone Asymmetries and SAGE Trends

DEREK M. CUNNOLD¹, JINLONG LI¹, HSIANG-JUI WANG¹, EUN-SU YANG¹, MICHAEL J. NEWCHURCH²

¹School of Earth and Atmospheric Sciences, Georgia Institute of Technology, Atlanta, Georgia, cunnold@eas.gatech.edu

²Atmospheric Sciences Department, University of Alabama in Huntsville, Huntsville, Alabama

A chemical box model constrained by Upper Stratosphere Research Satellite measurements of CH_4 , H_2O , NO_x and temperature in 1992-1994 has been used in an attempt to simulate ozone trend measurements from SAGE at 43 km, 45° latitude and their hemispheric differences. The model is successful in simulating the seasonal cycle in ozone mixing ratios observed by MLS and SBUV including the 15% larger values in the Southern Hemisphere at the wintertime ozone maximum. The model indicates that this hemispheric asymmetry is associated with hemispheric temperature differences of approximately 10° K; in contrast hemispheric differences in methane and the resulting effects on ClO_x make only a small contribution to this ozone asymmetry. The model predicts that, based on observed Cl_y increases, the ozone decrease in the Southern Hemisphere should have exceeded that in the Northern Hemisphere by approximately 1%/decade. This is consistent with an observed ozone hemispheric trend difference of $1.7 \pm 2.1\%$ /decade (one sigma) for 1979-1997 and $-0.8 \pm 2.8\%$ /decade for 1985-1997 from SAGE I and SAGE II (version 6.1) measurements. These trend differences are caused by hemispheric differences in temperature in early winter and in CH_4 in late winter. The model, based on changes in Cl_y but not in other specified parameters, overpredicts the downtrend observed by SAGE II in 1985-1997 by approximately $3.1 \pm 1.4\%$ /decade (one sigma), but it qualitatively simulates the observed ozone trend variations over the period 1979-1997. The underprediction would be reduced by approximately 1%/decade for a methane increase of 1%/year. Observed temperature decreases of approximately 0.1° K/year would have increased the calculated ozone downtrends on pressure surfaces by approximately 1%/decade but could have affected SAGE trends by a small amount in the opposite direction because of associated geopotential height changes.

ATMOSPHERIC CORRECTION OF SEAWIFS IMAGERY OVER THE MEDITERRANEAN SEA

Tulay Cokacar¹, Cyril Moulin², Nilgün Kubilay¹, Temel Oguz¹

¹ Institute of Marine Sciences, Middle East Technical University, Erdemli-TURKEY

² Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement, CEA-CNRS, Gif-Sur-Yvette, France

INTRODUCTION

The Mediterranean Sea is frequently affected by intense mineral dust transports from different sources (the Middle East and North Africa). It has been suggested that these transports has fertilization effect enhancing locally and temporally biogenic production. However, present atmospheric correction algorithms for ocean color sensors are not capable to handling absorbing mineral dust, and subsequently result in unrealistic phytoplankton pigment concentrations in surface waters. It is therefore crucially important to improve current SeaWiFS algorithms by filtering this effect in the Mediterranean Sea. In this study, we implemented the atmospheric correction method presented by Moulin et al. [2001]¹ for the North African coast of Atlantic (ATL models) to estimate improved dust optical properties (including absorption) over the Eastern Mediterranean from SeaWiFS spectral measurements. Here, as a case study, we select dust events that occurred during each April of 1998-2000 period, corresponding to most dusty period of these years. For pixels with optical thickness greater than 1, signifying strong dust events, the marine contribution to the SeaWiFS measurement is assumed to be negligible in the visible band. The measured reflectance spectrum is thus solely due to aerosol and molecular scattering. The aerosol reflectance for various dust absorbing efficiencies is computed by removing the contribution of molecular scattering. This process is repeated until the modeled reflectance matches the measured one. The results given below suggest some improvement in pigment concentrations.

METHOD

Description of Spectral Matching Algorithm

The atmospheric correction method is based on the spectral matching algorithm (SMA) proposed by Gordon et al., [1997]². The aerosol model is applied to SeaWiFS data on a pixel-by-pixel basis, and combined with a water-leaving radiance model, and then run for 22 different combinations of particle size distributions and indices of refraction with a vertical distribution of aerosol concentration. The radiative properties are computed using Mie theory and a vertical distribution of aerosol concentration.

Dust Sources in April

We combined aerosol observations of TOMS and SeaWiFS (Fig. 1) to investigate the sources of Saharan dust transport over the Mediterranean. Airborne plumes of desert dust predominantly comes from the North Africa during 1998 and 1999. But, during April 2000, dust from the Middle East also has important contribution.

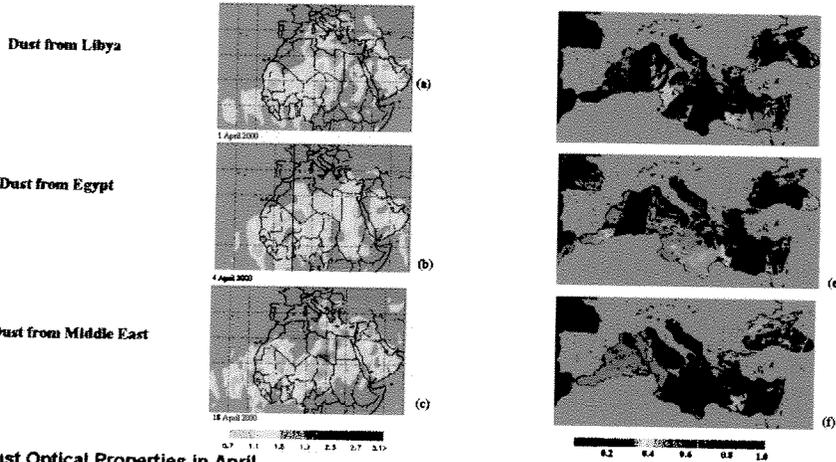
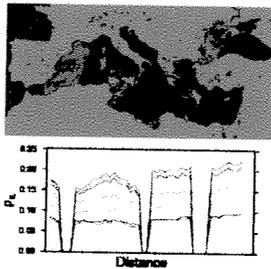


Fig. 1 (a,b,c) TOMS aerosol index images taken from the URL address <http://toms.gsfc.nasa.gov/pub/tmp/mee/usa/>, (d,e,f) SeaWiFS aerosol reflectance at 665 nm.

Dust Optical Properties in April

1. Dust from North Africa



We extracted reflectance from the images along a track (Fig. 2, a,b) across the dust plume coming from North Africa and Middle East.

Aerosol reflectance simulations (Fig. 3 a) predicted by ATL models fit the SeaWiFS reflectances along the track where dust comes from the North Africa. Surprisingly the ATL models also work well (slightly more absorbing) when dust coming from the Middle East (Fig. 3 b). We are trying to improve the matching by changing the optical properties of dust (imaginary part of the refractive index) for the Middle East case.

2. Dust from Middle East

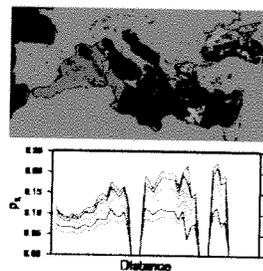


Fig. 2 SeaWiFS image of aerosol reflectance to define Track lines (a,b) satisfying the criterion of high optical depth.

Fig. 3 Extracted (solid line) and predicted (dashed line) values of aerosol reflectance (ρ_λ) along the track line (a) and (b): dark blue for 412 nm, light blue for 443 nm, green for 490 nm, yellow for 510 nm, orange for 555 nm, red for 670 nm, and black for 765 and 865 nm.

Application to Ocean Color Imagery

We compare retrieved pigment concentrations from the SMA and the standard (STD) SeaWiFS chlorophyll for April 1998, 1999 and 2000 (Fig. 4). The results indicate that the methodology shows considerable promise for processing ocean color imagery in presence of mineral dust.

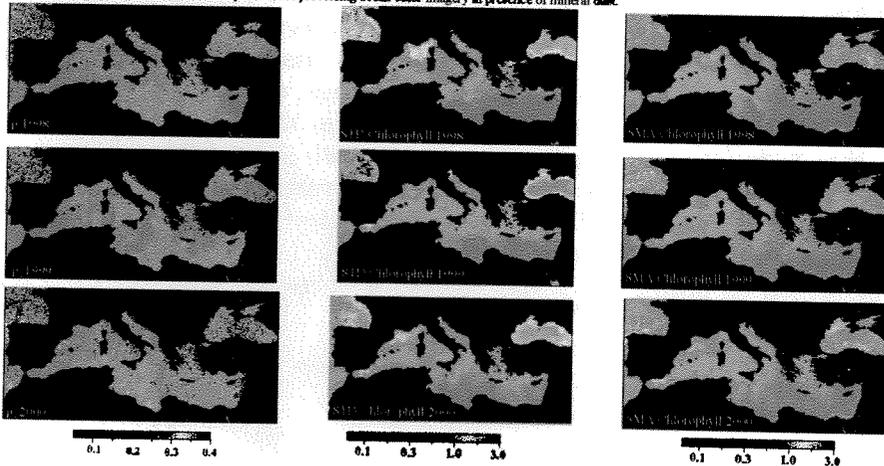


Fig. 4 April means of aerosol optical thickness at 865 nm (left), the pigment concentrations using STD (middle) and SMA (right) processes

SUMMARY

We used the set of mineral dust models within the spectral matching algorithm (SMA) of Gordon et al. [1997] to obtain more realistic surface chlorophyll concentrations in the Mediterranean for April 1998, 1999 and 2000. These periods are chosen since the atmosphere contains largest quantities of desert dust from North Africa and Middle East over the Eastern Mediterranean during the year. This method seems to improve the current estimates of chlorophyll concentration.

REFERENCES

- Moulin C, Gordon R.R., Chomé R.M., Bezon V.F., Evans R.H., Atmospheric Correction of Ocean Color Imagery through Thick Layers of Saharan Dust, *ORL*, Vol 28, No 1, 5-8, 2001
- Gordon, R.R., Atmospheric Correction of Ocean Color Imagery in the Earth Observing System Era, *J. Geophys. Res.*, 102D, 17081-17106, 1997.

ACKNOWLEDGEMENT

This work was supported by joint research project within a bi-lateral agreement between Turkish Scientific and Technical Research Council (TUBITAK) and Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS). Tulay Cokacar benefited from the research fellowship from START through the framework of RICAMARE to work in CNRS. We thank to the Project for production, and the Distributed Active Archive Center at the Goddard Space Flight Center for the Distribution of the data.

Structure of *Emiliana huxleyi* blooms in the Black Sea surface waters as detected by SeaWiFS imagery

Tulay Cokacar, Nilgun Kubilay, and Temel Oguz

Institute of Marine Sciences, Middle East Technical University, Erdemli, Icel, TURKEY

Abstract. The temporal and spatial characteristics of coccolithoprid *Emiliana huxleyi* blooms in the surface waters of the Black Sea are studied using the SeaWiFS mean normalized water-leaving radiances data for 1998-2000. It is shown that the Black Sea consistently experiences high reflectance patches of coccolith platelets throughout the basin each year during the May-July period. Although the Black Sea is masked by clouds, the data also suggest enhanced activity for some period during autumn and early winter. Their spatial patterns resemble very closely the circulation system derived from the altimeter data, and exhibit pronounced differences between cyclones and anticyclones. The cyclonic cell, which covers the entire interior part of the basin, appears as a more favourable site for more intense bloom formation. This is related with its relatively shallower mixed layer thickness and stronger mixed layer average water leaving radiance.

Introduction

Blooms of the coccolithophore *Emiliana huxleyi* and their coccolith platelets have global significance. They affect radiation budgets [Tyrrell *et al.*, 1999], regulate marine carbon cycling and ocean-atmosphere CO₂ exchange through their production of CaCO₃ [Holligan and Robertson, 1996], and provide high reflectance which allows their spatial and temporal extent to be visually monitored from space.

Since the first invasion of *E. huxleyi* into the Black Sea about 2000 years ago, high carbonate content in sediment cores [Hay and Honjo, 1989; Tekiroglu, 2001] indicates that they have always been one of the predominant species in the regional plankton community. Recent measurements suggest that *E. huxleyi* blooms sometime during the late spring-summer and the autumn-early winter periods in different parts of the basin [Sorokin, 1983; Benli, 1987; Mankovsky *et al.*, 1996; Uysal *et al.*, 1998]. A signature of the Black Sea *E. huxleyi* blooms has also been traced by aerosol filter samples collected daily at a site along the Mediterranean coast of Turkey [Ozsoy *et al.*, 2000]. Changes

in the methane sulfonic acid and sulfate concentrations at this site, when supported by air mass back trajectory analysis, were shown to be related to the Black Sea *E. huxleyi* bloom events. Although all these studies demonstrate occurrence of the *E. huxleyi* blooms in the Black Sea, their duration, persistence, spatial extent as well as relation with circulation dynamics are for the first time reported in the present paper by analyzing the SeaWiFS time series data.

Satellite data and processing method

The data used in this study comprise the normalized water leaving radiances from the 8-day composite, 9 km resolution, Level 3 SeaWiFS imagery for the period from the beginning of September 1997 to the end of December 2000. The algorithm used to map the distribution pattern of *E. huxleyi* blooms was originally developed and used for the analyses of CZCS imagery by Brown and Yoder [1994], Brown and Podesta [1997], and later modified for SeaWiFS imagery by Brown [2000]. It separates the spectral signatures of coccolith platelets according to the pre-specified ranges of five distinct combinations of mean normalized water leaving radiances (nLw) at 443, 510 and 555 nm. As given by Brown (2000), we set $0.60 < nLw443/nLw510 < 1.15$, $0.75 < nLw443/nLw555 < 1.85$, $1.0 < nLw510/nLw555 < 1.65$, $nLw443 > 1.1$, and $nLw555 > 0.9$ with radiances in units $mW\ cm^{-2}\ m^{-1}\ sr^{-1}$. The pixels satisfying all these criteria are assigned to have high concentration of coccoliths. Further details on the characteristics of these mean normalized water leaving radiances can be found in Gordon *et al.* [1988, 2001].

A set of experiments has been performed to test sensitivity of blooms to the values of these limits. Changing these numbers by $\pm 25\%$ did not generally lead to significant changes on spatial structure of the blooms. The most critical parameter was found to be the limiting value of $nLw443$. Its smaller values (within the 25% range) provided a wider coverage of coccoliths especially during spreading and decaying phases of the blooms. Its higher values, on the other hand, were found to be less critical for the bloom structure. Although they are included into the bloom classification algorithm, shelf areas with the total depth less than 200 m (mainly along the western coastal part of the basin) are excluded from the interpretation to avoid contamination by the high reflectances of lands or high turbidity shelf waters.

Copyright 2001 by the American Geophysical Union.

Paper number 2001GL013770.
0094-8276/01/2001GL013770\$05.00

Table 1. Monthly classification of the SeaWiFS data in terms of the *E. huxleyi* distribution from September 1997 to December 2000 in the Black Sea

1997		1998		1999		2000	
Jan.		X		BS (CL)		(CL)	
Feb.		X		BS (CL)		(CL)	
Mar.		X		NBS		X	
Apr.		X		X		X	
May	X	X	EBS	X	EBS	X	WBS BS
Jun.		BS		BS		BS	
Jul.	EBS	X	X	BS	EBS	X	EBS BS X
Aug.		X		X		X	
Sep.	WBS	X		X		WBS	
Oct.	X	X		X		WBS	X
Nov.	(CL)	X	WBS	BS (CL)		(CL)	(CL)
Dec.	(CL)	BS (CL)		(CL)		(CL)	(CL)

The symbol "X" refers to no bloom, whereas "(CL)" means cloud coverage with a total absence of information on the *E. huxleyi* activity. "BS" signifies presence of the bloom within the entire basin, while the prefix "W", "E" or "N" implies its presence only in the western, eastern or northern part of the sea, respectively. "BS(CL)" suggests cloud coverage over the entire basin, but some scattered data values are readily available to signify the bloom occurrence in different parts of the basin. Extension of single column information for an entire month into three subcolumns for certain months provides a more detailed, 10-days average, temporal structure of the blooms.

Temporal and spatial characteristics of *E. huxleyi* blooms in the Black Sea

An overview of the *E. huxleyi* bloom episodes inferred from the SeaWiFS data examined within the framework of this study is shown in Table 1. For all these three years, the major bloom activity attains its most intense and widest coverage during June, and diminishes gradually within the first half of July. A similar activity also occurs in autumn months, although the blooms are traced mostly by some scattered data points irregularly distributed among clouds over the basin. The *in situ* data shown in Fig. 1 for the summer-autumn 1998 and early winter 1999 periods from the interior part of the western basin provide an independent support for the bloom occurrence, and more importantly establish validity and reliability of the SeaWiFS coccolith detection algorithm. The algorithm is also checked by verifying consistency of its products with corresponding actual true color SeaWiFS images.

In 1998, the bloom initiates from the eastern basin during mid-May and spreads rapidly towards the west and occupies the entire basin by the end of the month. The bloom remains uniform throughout the sea in June (Fig. 2a), and then begins to weaken from the western to eastern basin. It, left only within the eastern basin during early July, is depleted completely around mid-July. The year 2000 summer bloom activity also exhibits a similar structure. The bloom is initiated approximately two weeks earlier, and maintains its full basin scale structure from mid-May to third week of June (Fig. 2b). Once again, it weakens gradually from the western to eastern basin during July. A notable feature for both of these two years is remarkably rapid

development of the bloom and its spreading basinwide; they all took place within about a week. In 1999, on the other hand, the bloom structure possesses a patchy character, and is confined mostly to the eastern basin. The bloom started to spread from the northern part of the eastern basin during mid-May, covered the eastern basin by the end of May, and expanded into the western basin for a short period of time toward the end of June (Fig. 2c). By mid-July, only some scattered coccolith patches remained noticeable in the eastern basin.

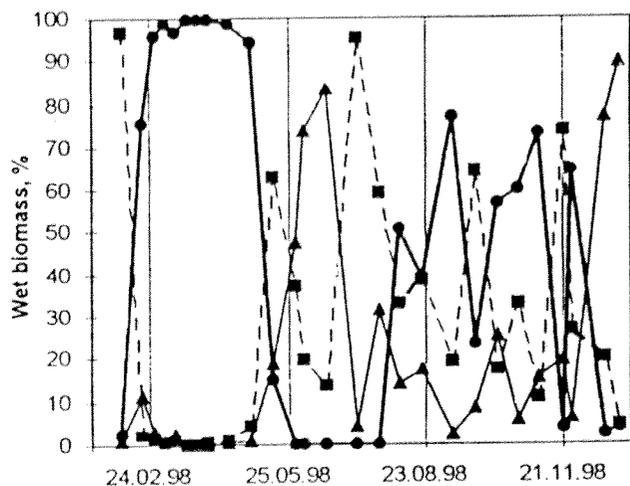


Figure 1. Relative contribution of diatoms (circles), dinoflagellates (squares) and *E. huxleyi* (triangles) to annual phytoplankton biomass structure obtained from bi-weekly surface measurements within the central part of the western basin within the region of 30-31°E, 42-43°N from February 1998 to January 1999 (after Churlikova *et al.*, [1999]).

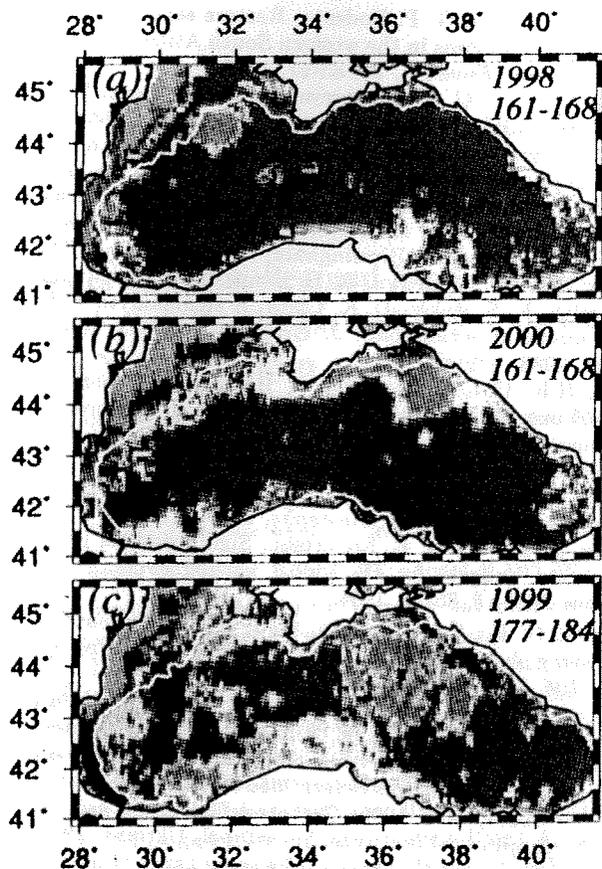


Figure 2. The coccolith distributions in the Black Sea as determined by the 8-day composite SeaWiFS data for Julian days (a) 161-168 in 1998, (b) 161-168 in 2000, and (c) 177-184 in 1999. They all correspond to the periods of most intense coccolith activity. The red color indicates the regions in which all the five criteria of the coccolith detection algorithm are satisfied. The yellow and green colors represent the regions when only four and three of these criteria are satisfied, respectively. The yellow color zones generally indicate the regions in which $nLw443$ varies between 0.9 and 1.1, and thus may be considered as the regions prone to the *E. huxleyi* bloom activity. The curve in white color represents 200 m topography contour separating the shelf from the interior basin. The regions in gray color indicate cloud coverage.

Persistency and basinwide coverage of *E. huxleyi* blooms make the Black Sea a potential regional source of calcite carbon and DMS sulfur production. The data reported by Mankovsky *et al.*, [1996] on the July 1992 *E. huxleyi* bloom measurements suggested an average value of $3850 \times 10^6 \text{ cell m}^{-3}$ within a 20 m layer. Using $1.1 \text{ pg DMSP cell}^{-1}$ as used by Brown and Yoder, [1994] and using a surface area of $300\,000 \text{ km}^2$ (approximately 70% of the total surface area covering the deep part of the basin), we estimate ~ 5700 tons of DMS sulfur production for this particular event. The calcite carbon production can be estimated to vary between the two extreme values of 0.12 and 3.9×10^9 tons depending on the assumption of 0.02 and 0.065 g calcite carbon per

cubic meter, respectively. These values are comparable with the estimates for subpolar latitudes [Brown and Yoder, 1994] and western south Atlantic Ocean [Brown and Podesta, 1997]. They therefore imply an important role of the Black Sea *E. huxleyi* blooms on the biogeochemistry, ecology and climatology of the region.

Dependence of *E. huxleyi* blooms on the circulation system

The Black Sea possesses a highly complex, eddy-dominated, predominantly cyclonic upper layer circulation system [Korotaev *et al.*, 2001]. This includes a band of strong Rim Current system encircling the basin over the steep continental slope, an interior cell composed mainly by an interconnected series of cyclonic eddies of different sizes, as well as some anticyclonic eddies on the coastal side of the Rim Current zone. While a part of these coastally-attached eddies constitutes quasi-stable/recurrent features persisting for seasonal and/or longer time scales, the overall peripheral circulation system essentially possesses a highly transient character involving a chain of eddies, meanders and fila-

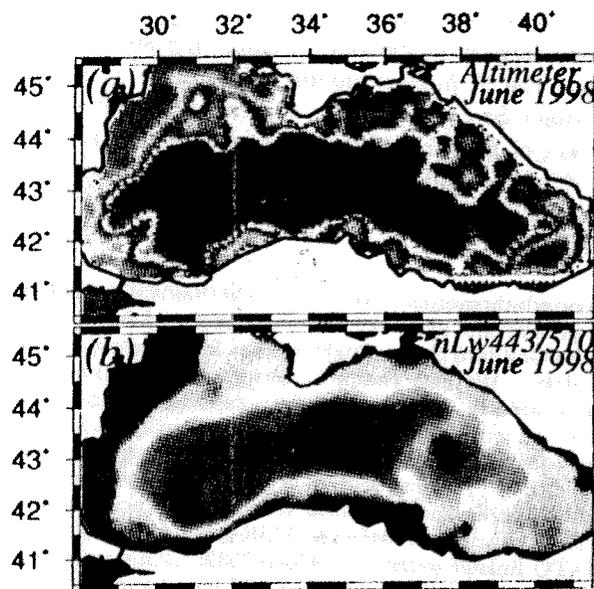


Figure 3. (a) 10-day average sea surface height anomaly field (in cm) computed from Topex-Poseidon and ERS II altimeter data for mid-June 1998. The negative values with the color range from violet to blue indicate cyclonic circulation, and the positive values with the color range from green to red indicate anticyclonic circulation. The Rim Current is shown by the grey color, (b) 8-day composite $nLw443/nLw510$ field for Julian days 161-168, 1998 (which approximately correspond to the second week of June). Red color indicates highest reflection from the cyclonic interior, whereas yellow and green colors indicate weaker reflection around the periphery (anticyclones) of the basin. Similar type spatial variability may also be inferred by other normalized water leaving radiances data. The one chosen here has no particular significance.

ments propagating cyclonically around the basin. Their translation and evolutionary characteristics introduce a major control on the mesoscale structure of the circulation system. The sea surface height anomaly field (Fig. 3a) derived from the June 1998 altimeter data reveals most of these characteristic features of the circulation system.

The mean normalized water leaving radiances data show an intimate relation between spatial patterns of the coccolith blooms and mesoscale character of the basinwide circulation system. For example, the pattern shown in Fig. 3b for the June 1998 basinwide bloom event (Fig. 2a) compares remarkably well with the altimeter data (Fig. 3a) in terms of the cyclonic cell occupying the interior part of the basin, the meandering Rim Current system around the periphery, as well as position of the coastal anticyclonic eddies. The cyclonic cell characterized by relatively shallower mixed layer (typically ≤ 20 m in June) coincides with the region of stronger mixed layer average water leaving radiances as compared to the case of anticyclonic dominated peripheral zone having deeper mixed layer of the order of ~ 30 m. The combination of these two features of cyclones features of cyclones makes them more favourable sites for more intense bloom formation. The presence of a persistent large scale cyclonic circulation system therefore gives the *E. huxleyi* blooms a basinwide character in the Black Sea. In a similar context, preferential development of *E. huxleyi* blooms on shallower stratification and higher light intensities was noted by Nanninga and Tyrrell [1996] using data from the N. Atlantic and elsewhere.

Acknowledgments. We thank the SeaWiFS Project for the production, and the Distributed Active Archive Center at the Goddard Space Flight Center for the distribution of the data. We also thank C. Brown for providing the algorithm used in this study, and his comments during the course of this work. We are grateful to T. Churlikova and G. Korotaev for providing us the data for Fig. 1, and Fig. 3a, respectively. T. Cokacar and N. Kubilay acknowledges the Turkish Scientific and Technical Research Council support 100Y121. T. Oguz acknowledges NSF grant OCE-9906656, and NATO linkage grant EST.CLG975821. This work is a contribution to the Black Sea-ODBMS Project sponsored by the NATO Science for Peace Program.

References

- Benli, H., Investigation of plankton distribution in the southern Black Sea and its effect on particle flux, in *Particle flux in the ocean*, edited by E. T. Degens and E. Izdar, pp. 77-87, Mitteilungen des Geologisch-Palaontologischen Institutes, Universität Hamburg, 62, 1987.
- Brown, C.W., Spatial and temporal variability of *Emiliania huxleyi* blooms in SeaWiFS imagery, paper presented at American Geophysical Union, Ocean Sciences Meeting, San Antonio, Texas (USA), 24-28 January 2000.
- Brown, C. W., J. A. Yoder, Coccolithophoroid blooms in the global ocean, *J. Geophys. Res.*, 99, 7467-7482, 1994.
- Brown, C. W., and G. P. Podesta, Remote sensing of coccolithophore blooms in the western South Atlantic Ocean, *Remote Sens. Environ.*, 60, 83-91, 1997.
- Churlikova, T. I., G. P. Berseneva, L. V. Georgieva, S. V. Stanichny, Light absorption by phytoplankton, detritus and dissolved organic substances during diatom and coccolithophore blooms in the Black Sea: impact on algorithms for remote sensing, paper presented at International Association for the Physical Sciences of the Oceans (IAPSO) Symposium, Birmingham, UK, 28-30 July, 1999.
- Gordon, H.R., O. B. Brown, R. H. Evans, J. W. Brown, R. C. Smith, K. S. Baker, D. K. Clark, A semianalytic radiance model of ocean color, *J. Geophys. Res.*, 93, 10909-10924, 1988.
- Gordon, H.R., G. C. Boynton, W. M. Balch, S. B. Groom, D. S. Harbour, T. J. Smyth, Retrieval of coccolithophore calcite concentration from SeaWiFS imagery, *Geophys. Res. Letters*, 28, 1587-1590, 2001.
- Hay, B. J., S. Honjo, Particle sources in the present and Holocene Black Sea, *Oceanography*, 2, 26-31, 1989.
- Holligan, P. M., and J. E. Robertson, Significance of ocean carbonate budgets for the global carbon cycle, *Global Change Biol.*, 2, 85-95, 1996.
- Korotaev, G. K., O. A. Saenko, C. J. Koblinsky, Satellite altimetry observations of the Black Sea level, *J. Geophys. Res.*, 106, 917-933, 2001.
- Mankovsky, V. I., V. L. Vladimirov, E. I. Afonin, A. V. Mishonov, M. V. Solovev, B. E. Anninskiy, L. V. Georgieva, O. A. Yunev, Long-term variability of the Black Sea water transparency and factors determined its strong decrease in the late 1980s, early 1990s *Technical Report*, 32 pp., Marine Hydrophysical Institute, Sevastopol, Ukraine, 1996.
- Nanninga, H. J., and T. Tyrrell, The importance of light for the formation of algal blooms by *Emiliania huxleyi*, *Mar. Ecol. Progr. Ser.*, 136, 195-203, 1996.
- Ozsoy, T., C. Saydam, N. Kubilay, I. Salihoglu, Aerosol nitrate and non-sea-salt sulfate over the eastern Mediterranean, *The Global Atmosphere and Ocean System*, 7, 185-228, 2000.
- Sorokin, Yu. I. The Black Sea, in *Ecosystems of the World, 26: Estuaries and Enclosed Seas*, edited by B. H. Ketchum, Elsevier Scientific Publishing Company, pp. 253-292, 1983.
- Tekiroglu, E., V. Ediger, S. Yemencioğlu, S. Kapur, E. Aka, The experimental analysis on the late quaternary deposits of the Black Sea, *Oceanologica Acta*, 24, 51-67, 2001.
- Tyrrell, T., P. M. Holligan, and C. D. Mobley, Optical impacts of oceanic coccolithophore blooms, *J. Geophys. Res.*, 104, 3223-3241, 1999.
- Uysal, Z., A. E. Kideys, L. Senichkina, L. Georgieva, D. Al-tukhov, L. Kuzmenko, L. Manjos, E. Eker, Phytoplankton patches formed along the southern Black Sea coast in spring and summer 1996, in *Ecosystem Modeling as a Management Tool for the Black Sea*, edited by L. I. Ivanov and T. Oguz, vol 1, pp. 151-162, Kluwer Academic Publishers, Netherlands, 1998.

T. Cokacar, N. Kubilay and T. Oguz Institute of Marine Sciences, Middle East Technical University PO Box 28, Erdemli 33731, Icel, Turkey. (e-mail: tulay@ims.metu.edu.tr; kubilay@ims.metu.edu.tr; oguz@ims.metu.edu.tr)

(Received July 12, 2001; revised August 30, 2001; accepted September 20, 2001.)

Influence of Black Sea and local biogenic activity on the seasonal variation of aerosol sulfur species in the eastern Mediterranean atmosphere

Nilgün Kubilay, Mustafa Koçak, Tülay Çokacar, and Temel Oguz
 Institute of Marine Sciences, Middle East Technical University, Erdemli, Turkey

Giorgos Kouvarakis and Nikos Mihalopoulos

Environmental Chemical Processes Laboratory, Department of Chemistry, University of Crete, Heraklion, Greece

Received 6 February 2002; revised 28 March 2002; accepted 13 April 2002; published 12 November 2002.

[1] Methanesulfonate (MSA) and non-sea-salt (nss) sulfate concentrations were measured in bulk aerosol samples collected during January 1996 to December 1999 at two stations along the Turkish and Cretan coastline of the eastern Mediterranean. The data set enabled the origin and variability of biogenically derived sulfate concentrations in the eastern Mediterranean atmosphere to be defined. Although similar seasonal patterns of MSA and nss-sulfate concentrations for both stations were detected, the mean concentrations at Erdemli (Turkey) over the sampling period ($42 \pm 52 \text{ ng m}^{-3}$ MSA, and $6.8 \pm 5.2 \text{ } \mu\text{g m}^{-3}$ nss sulfate) were found to be almost twice that of those measured at Finokalia, Crete ($25.8 \pm 14.9 \text{ ng m}^{-3}$ MSA and $3.9 \pm 1.7 \text{ } \mu\text{g m}^{-3}$ nss sulfate). Analysis of the air mass back trajectory and the Sea-viewing Wide Field-of-view Sensor (SeaWiFS) data suggests that the majority of the biogenic contribution at Erdemli is originated from summer coccolithophorid *Emiliania huxleyi* blooms developed in the Black Sea. The data further points to a significant relationship between Saharan dust transport events and local oceanic production of MSA through occasional fertilization of the eastern Mediterranean during wet deposition events. This process accounts for episodic, strong weekly changes in MSA concentrations during the spring months. Considering that Erdemli and Finokalia are approximately 1000 km apart from each other geographically, large differences in their MSA and nss-sulfate concentrations indicates a considerable role of regional mesoscale atmospheric transport processes on the spatial structure of biogenically produced atmospheric sulfur aerosols.

INDEX TERMS: 0305 Atmospheric Composition and Structure: Aerosols and particles (0345, 4801); 3339 Meteorology and Atmospheric Dynamics: Ocean/atmosphere interactions (0312, 4504); 0933 Exploration Geophysics: Remote sensing; 0315 Atmospheric Composition and Structure: Biosphere/atmosphere interactions; **KEYWORDS:** aerosol, eastern Mediterranean, methane sulfonate, nss-sulfate, *Emiliania huxleyi*, Black Sea

Citation: Kubilay, N., M. Koçak, T. Çokacar, T. Oguz, G. Kouvarakis, and N. Mihalopoulos, Influence of Black Sea and local biogenic activity on the seasonal variation of aerosol sulfur species in the eastern Mediterranean atmosphere, *Global Biogeochem. Cycles*, 16(4), 1079, doi:10.1029/2002GB001880, 2002.

1. Introduction

[2] Biologically produced gases in the surface ocean have a major impact on the global atmospheric cycling of elements such as sulfur, nitrogen and carbon, and hence may play an important role in the global climate system. Dimethyl sulfide (DMS) is the principal and most abundant biogenic organic sulfur compound entering the atmosphere, where it undergoes photochemical oxidation and transformation to methanesulfonate (MSA). It provides the biogenic contribution to non-sea-salt sulfate (nss-sulfate) in marine aerosols. The importance of nss-sulfate comes from its

effect on the Earth's radiation budget by backscattering solar radiation to space [Charlson *et al.*, 1991] and by controlling the formation of cloud condensation nuclei [Charlson *et al.*, 1987].

[3] As shown in Table 1, concentrations of aerosol MSA and nss-sulfate have illustrated considerable spatial and temporal variabilities within the global atmosphere. When compared to other open ocean locations, the marine atmosphere over the eastern Mediterranean exhibits high levels of nss-sulfate concentrations similar to the values typically observed over the neighboring heavily industrialized land-mass of Europe, and of MSA concentrations as in Icelandic-North Atlantic waters and in the North Pacific [Mihalopoulos *et al.*, 1997; Luria *et al.*, 1989; Ganor *et al.*, 2000; Özsoy *et al.*,

Table 1. Comparison of the Mean and Range of Aerosol Sulfate and Methanesulfonate Concentrations Reported From Various Locations Around the World

Location	nss-SO ₄ ²⁻ (µg m ⁻³)	MSA (ng m ⁻³)
<i>Pacific Ocean^a</i>		
New Zealand (36°S, 174°E) ^b	0.76 (0–1.5)	34.9 (1.9–136)
American Samoa (14°S, 171°W)	0.41 (0.14–0.74)	26 (10–45)
Fanning Island (4°N, 159°W)	0.67 (0.39–0.98)	45 (25–68)
Shemya (52°N, 174°E)	–	97 (10–300)
<i>Atlantic Ocean^c</i>		
Sal Island (17°N, 23°W)	1.99 (0.25–9.6)	27 (7.8–92)
Miami (26°N, 80°W)	2.17 (1.7–3.6)	39 (25–58)
Mace Head (53°N, 10°W)	1.08 (0.02–22.6)	50 (0.1–552)
Iceland (63°N, 20°W)	0.65 (0.06–23.7)	39 (0.1–408)
Atlantic Ocean (meridional transect from 42°S to 54°N) ^d	(0.3–9)	(3–90)
Island Sylt in the North Sea	–	(15–300)
<i>Eastern Mediterranean</i>		
Erdemli (36°N, 34°E) ^e	7.0 (0–35.4)	45 (1–383)
Finokalia (35°N, 25°E) ^f	4.1 (0.1–12.4)	27 (4–99)
Israeli coast ^g	7.4 (2–50)	(21–82)
<i>Continental Europe^h</i>		
Greece (38°N, 23°E)	3.7 (1.1–35.6)	
Hungary (46°N, 19°E)	5.9 (0.06–28.9)	
Italy (45°N, 8°E)	3.3 (0.06–14.1)	
Czech Republic (49°N, 15°E)	4.2 (0.3–14.1)	
Poland (54°N, 17°E)	3.6 (0.3–14.9)	
Lithuania (55°N, 21°E)	3.5 (0.8–15.1)	
Russian Fed. (59°N, 29°E)	2.1 (0.1–18.6)	

^a Saltzman et al. [1986].^b Wylie and de Mora [1996].^c D. Savoie (personal communication, 2002).^d Burgermeister and Georgii [1991].^e Present study.^f Kouvarakis and Mihalopoulos [2002].^g Ganor et al. [2000]; Luria et al. [1989].^h Hjellbrekke [2000].

2000; Kouvarakis and Mihalopoulos, 2002]. However, recent SeaWIFS time series data has confirmed very poor biological production of the eastern Mediterranean. The data, therefore, indicate inability to support such high levels of MSA concentrations. Özsoy et al. [2000] have highlighted a close relationship between high nss-sulfate concentrations measured at Erdemli (Turkey) and a particular *Emiliania huxleyi* bloom event in the Black Sea during July 1992. This relationship, however, has not been supported explicitly by measurements of DMS and/or MSA concentrations as well as the spatial coverage, intensity, and duration of this particular *E. huxleyi* bloom event.

[4] To our knowledge, the only long-term time series data on MSA measurements in the eastern Mediterranean belong to the site at Finokalia, a coastal rural site located on Crete [Kouvarakis and Mihalopoulos, 2002]. While this data set represented the conditions of the western part of the eastern Mediterranean, the marine atmosphere over the eastern part (i.e., the Levantine Sea) has not been monitored systematically. This paper presents research findings which describes the first-reported time series data for MSA measurements over a 4-year period (1996–1999) at a station located along the Turkish coast of the Levantine basin at Erdemli. This data set is evaluated together with the complementary data from Finokalia in order to define the large scale regional and

seasonal variations of MSA and nss-sulfate over the eastern Mediterranean. An independent evaluation of the Finokalia data set within the framework of the local sulfur budget analysis has been presented recently by Kouvarakis and Mihalopoulos [2002] and Kouvarakis et al. [2002].

[5] The current work primarily aims to provide a more definitive explanation for the presence of appreciably high MSA and nss-sulfate concentrations within the marine atmosphere of the poorly productive Eastern Mediterranean during the summer months. Using in situ MSA and nss-sulfate measurements together with SeaWIFS data, and the air mass back trajectory analyses, the enhanced biological activity in the Black Sea is shown to be the primary explanation for the presence of elevated late-spring, summer sulfate aerosol concentrations in the easternmost part of the eastern Mediterranean. The current work, in addition, explores the role of local production triggered by episodic short-term pulses of Saharan dust on the variability of MSA concentrations during the spring season at times when there is wet deposition onto the surface waters of the eastern Mediterranean Sea [Kubilay et al., 2000].

[6] The paper is structured as follows. Section 2 briefly describes the data collection and analyses techniques, including air mass back trajectory analyses. Section 3 provides an overview for the general ecosystem characteristics of the Black Sea and the eastern Mediterranean from the perspective of atmospheric sulfur aerosol production. This section also includes some new results from our ongoing studies on the characteristics of *E. huxleyi* blooms in the Black Sea-Aegean Sea-eastern Mediterranean system. Following the presentation of seasonal variations of MSA and nss-sulfate concentrations at Erdemli and Finokalia in section 4, we report our findings on the possible connection between the Black Sea summer biological production and the elevated MSA concentrations of the eastern Mediterranean atmosphere in section 5. Section 6 attempts to relate weekly variations of the MSA concentrations during spring to episodic Saharan dust events and their subsequent deposition and fertilization to the eastern Mediterranean surface waters. Finally, a summary of the results and the main conclusions are given in section 7.

2. Material and Methods

[7] Bulk aerosol samples were collected at a rural site on the south-eastern coast of Turkey (Erdemli, 36°33'N and 34°15'E) using Whatman 41 cellulose fiber filters (20 cm × 25 cm), and at a remote location on the northern coast of Crete (Finokalia, 35°24'N and 25°60'E) on 0.45 µm Gelman Zeffluor PTFE filters using hi-vol and low-vol samplers, respectively. Sampling has been carried out at daily intervals at Erdemli. It has varied in the range from 3 to 48 hours at Finokalia. The sampling locations are illustrated in Figure 1. For more details on local conditions of the sampling sites and aerosol collections, please refer to Kubilay et al. [2000], Özsoy et al. [2000], Mihalopoulos et al. [1997] and Kouvarakis et al. [2000].

[8] The major soluble ion species within the atmospheric aerosol extracts were analyzed by ion chromatography (IC) using a Dionex AS4A-SC column with an ASRS-I suppres-

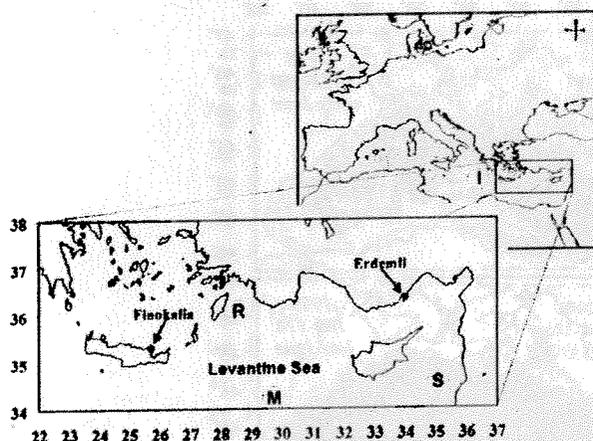


Figure 1. Location map of the eastern Mediterranean and the sampling site on the island of Crete (Finokalia) and on the southern coast of Turkey (Erdemli). R, M, and S refer to approximate locations of Rhodes, Mersa Matruh, and Shikmona gyres of the Levantine Basin, respectively. I in the greater Mediterranean Sea plot represents the region of the Ionian Sea.

sor. SO_4^{2-} (sample volume: 100 μl) was determined with an isocratic elution at 2.0 ml min^{-1} using a $\text{Na}_2\text{CO}_3/\text{NaHCO}_3$ eluent. MSA^- (sample volume: 500 μl) was determined with isocratic elution with a 2.5 mM $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ eluent and a flow rate of 2.0 ml min^{-1} . For cations a CS12-SC column was used with a CSRS-I suppressor. Separation was achieved under isocratic conditions with a 20 mM MSA eluent and a flow rate of 1.0 ml min^{-1} . The reproducibility of the measurements was better than 2% and the detection limit corresponded to 2 pmol m^{-3} for a mean air volume of 1000 m^3 . Non-sea-salt sulfate concentrations were calculated using Na^+ as a conservative tracer of sea-salt origin. More details on the analytical technique are given by Baboukas et al. [2000].

[9] Air mass back trajectories were provided by the European Centre for Medium Range Weather Forecasts (ECMWF). The trajectories show routes of air masses arriving between the surface and 850 hPa at the sampling sites for the past 72 hours.

3. General Characteristics of the Black Sea and Eastern Mediterranean Ecosystems in Relation to Oceanic Production of Atmospheric Sulfur

3.1. Black Sea Ecosystem Characteristics

[10] Riverine discharge into the northwestern part of the Black Sea has been altered considerably since the 1970s owing to the diminishing net fresh water inflow (due to the construction of dams). There has also been an enhancement in the nutrient fluxes (due to pollution). This has led to the development of massive eutrophication events and changes in the nutrient content of surface waters. One outcome has been the dramatic change in the ecosystem of the Black Sea at all trophic levels. Phytoplankton community structure and

species succession have been shifted from a diatom-dominated siliceous system to a dinoflagellate and coccolithophorid-dominated nonsiliceous system [Humborg et al., 1997]. The number of species observed to bloom has doubled, areal coverage of the blooms has expanded ten-fold [Zaitsev and Mamaev, 1997], and the natural phytoplankton annual cycle with spring and autumn maxima has been replaced by a pattern involving a series of exceptional maxima [Yilmaz et al., 1998]. Quantitative evaluation of the factors controlling these ecosystems changes and their implications on the overall biogeochemical characteristics of the water column have been reviewed by Oguz et al. [2001].

[11] The observed SeaWiFS-derived surface chlorophyll concentrations persistently range (every year since 1997) from ~ 1.0 – 1.5 mg m^{-3} . They prevail over the basin throughout the autumn, winter, and early spring, suggesting high biological activity throughout the sea within the second half of the 1990s [see Oguz et al., 2002, Figures 7 and 8]. In addition, the SEAWIFS chlorophyll patterns revealed complex spatial structure around the periphery of the basin where the meandering Rim Current circulation system maintains a continuous supply of nutrients from the northwestern shelf into the basin [see Oguz et al., 2002, Figure 12]. The overall production is especially strong in the heavily polluted waters of the northwestern shelf, as well as of the adjacent Azov Sea on the north and the Marmara Sea to the southwest, which interact with the Black Sea through the Kerch and Bosphorus Straits, respectively. These regions, constituting almost 30% of the Black Sea total surface area, are identified by permanently high surface chlorophyll concentrations greater than 5 mg m^{-3} , irrespective of the seasons.

[12] A major proportion of productivity in the region appears to be composed of strong DMS producers, such as haptophytes (including coccolithophorids and small flagellates) and small dinoflagellates especially during the spring and summer months [Moncheva et al., 1998; Eker et al., 1999; Çokacar et al., 2001]. All the available findings suggest that within the last 2 decades, the Black Sea ecosystem has transformed from a mesotrophic system with a limited plankton productivity into a potential year-round DMS supplier for the atmosphere over the Black Sea-Aegean Sea-eastern Mediterranean Sea system. Unfortunately, the measurements providing quantitative estimates for the annual DMS and MSA production rates and their seasonal variations are not presently available for the Black Sea.

[13] The coccolithophorid *E. huxleyi* has always been one of the predominant species in the Black Sea plankton community. They have been traced by a high carbonate content in sediment cores [Hay and Honjo, 1989; Tekiroglu et al., 2001], by in situ measurements [Sorokin, 1983; Benli, 1987; Mankovsky et al., 1996; Uysal et al., 1998], and from Coastal Zone Color Scanner (CZCS) imagery [Sur et al., 1994] in different parts of the basin, some periods during the late spring-summer and the autumn-early winter. Using the 8-day composite, 9-km resolution, level 3 SeaWiFS water-leaving radiance data (normalized as if it would be measured on the ocean surface with the sun directly overhead) for 1997–2000, the temporal and spatial character-

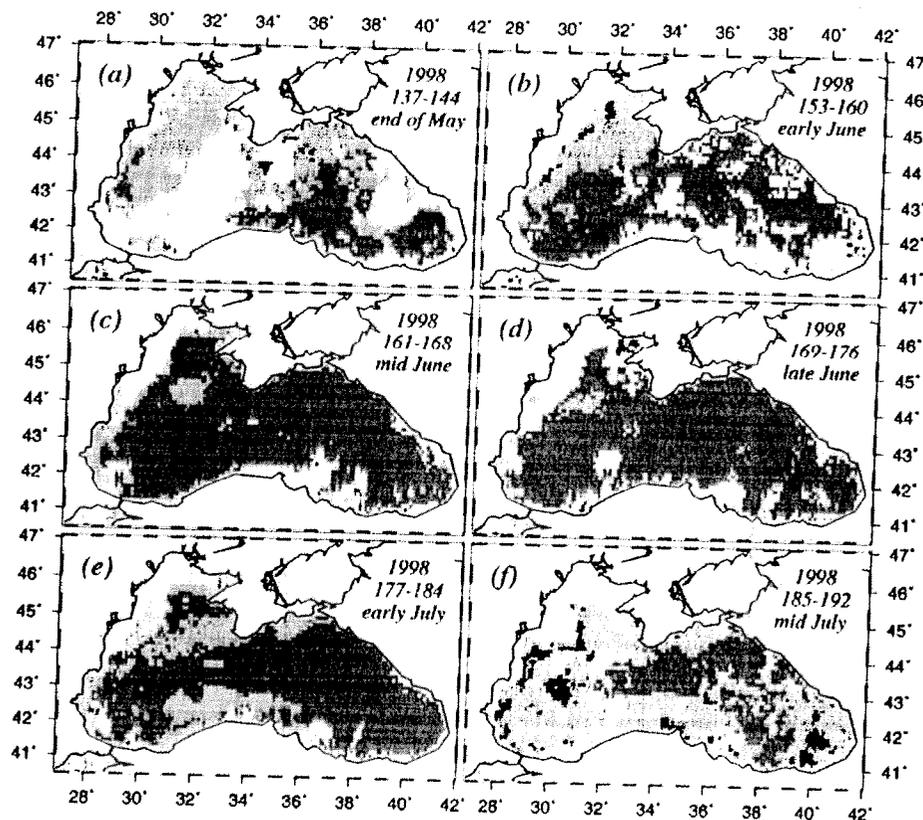


Figure 2. SeaWiFS-derived 8-day-composite coccolith distributions within the Black Sea during May–July 1998 period at Julian days (a) 137–144 (end of May), (b) 153–160 (early June), (c) 161–168 (mid-June), (d) 169–176 (late-June), (e) 177–184 (early July), and (f) 185–192 (mid-July). Black represents the regions covered by coccoliths, shading represents the regions without coccoliths, and white shows no data due to cloud coverage.

istics of the blooms have been identified in the surface waters of the Black Sea according to the distinct spectral signatures of coccolith platelets [Çokacar *et al.*, 2001]. The pixels satisfying the prespecified ranges of five distinct combinations of mean normalized water leaving radiances at 443, 510, and 555 nm have been considered to represent high concentrations of coccoliths.

[14] According to this analysis, the Black Sea experiences high reflectance patches of coccolith platelets throughout the basin each year during the May–July period (Figures 2 and 3). During 1998, the bloom marked in Figure 2 by black areas seemed to originate from the southeastern part of the Black Sea toward the end of May (Figure 2a), and then rapidly spreads throughout the basin within a week (Figure 2b), and persisted on a basinwide coverage for the entire month of June, 1998 (Figures 2c and 2d). The bloom began to diminish by early July (Figure 2e), and finally disappeared toward the end of July (Figure 2f).

[15] During the same period (May–July) of 1999, the bloom structure possessed a more patchy character (Figure 3). It commenced to spread from the northern peripheral waters of the eastern basin during mid-May (Figure 3a), eventually covering the entire eastern basin by the end of May and the early June (Figures 3b and 3c), and then

expanded into the western basin toward the end of June (Figures 3d and 3e). By mid-July, some scattered coccolith patches remained noticeable in the eastern basin (Figure 3f).

[16] It should be noted that the Sea of Azov and the western shallow coastal waters are excluded from the interpretation of the data in these figures in order to avoid contamination from high-turbidity shelf waters. Although the current versions of the SeaWiFS algorithms are not reliable enough to infer *E. huxleyi* blooms in turbid waters, these heavily polluted regions, known to be very productive for almost the entire year, are characterized by complex phytoplankton species structure capable of producing DMS.

3.2. Eastern Mediterranean Sea Ecosystem Characteristics

[17] In contrast to the Black Sea, the Mediterranean Sea, particularly the Eastern Basin, is an extremely oligotrophic system [Dugdale and Wilkerson, 1988; Azov, 1991; Yacobi *et al.*, 1995]. In the eastern Mediterranean Sea, the biological production most actively takes place only along selected coastal and peripheral waters [Psarra *et al.*, 2000], and in the Rhodes cyclonic gyre [Napolitano *et al.*, 2000]. The rest (i.e., the anticyclonic gyres of the Ionian basin and the anticyclonic Mersa-Matruh and Shikmona

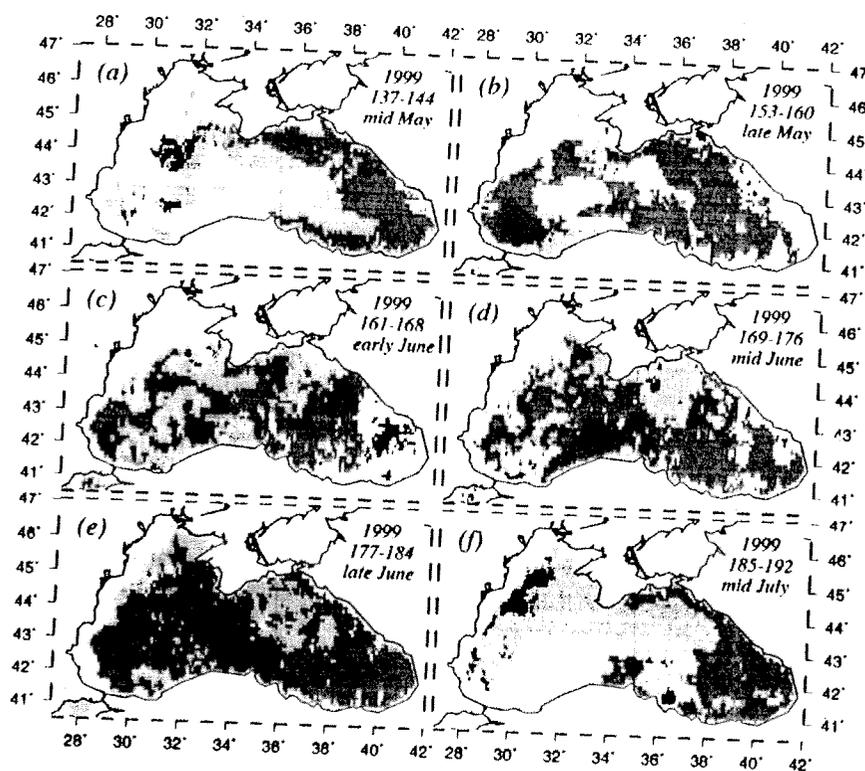


Figure 3. SeaWiFS-derived 8-day-composite coccolith distributions within the Black Sea during the May–July 1999 period at Julian days (a) 129–136 (mid-May), (b) 145–152 (late May), (c) 161–168 (mid-June), (d) 169–176 (late-June), (e) 177–184 (early July), and (f) 185–192 (mid-July). Black represents the regions covered by coccoliths, shading represents the regions without coccoliths, and white shows no data due to cloud coverage.

gyres of the Levantine basin as well as the Cretan Sea) in comparison has a low productivity. The monthly averaged pigment concentrations derived from the CZCS data for the eastern Mediterranean during the period 1979–1985 reveal highest concentrations of $\sim 0.2 \text{ mg m}^{-3}$ during the December–March period [see Ziveri *et al.*, 2000, Figure 6]. These concentrations are approximately an order of magnitude smaller than the corresponding values in the Black Sea [see Nezhlin, 2000, Figure 1].

[18] The sediment trap measurements performed from November 1991 to August 1994 at 3000 and 3500 m depths in the westernmost part of the eastern Mediterranean [Ziveri *et al.*, 2000] indicated that coccolithophores (mainly *E. huxleyi*) are the most dominant and abundant phytoplankton group with the highest fluxes taking place during March–April–May. These findings are also supported by the measurements of Knappertsbusch [1993] and Balopoulos *et al.* [1996]. The trap data further suggested that even though coccolithophore production dominated the system, its abundance within traps rarely reached the bloom level. The annual total coccolith flux of $1.0 \times 10^{10} \text{ coccoliths m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ was actually 10–100 times lower than those measured in other oceanographic regions [see Ziveri *et al.*, 2000] and

in the Black Sea [Hay and Honjo, 1989]. Because of their relatively low abundance, their detection by the SeaWiFS sensors is not as successful as in the Black Sea.

[19] Some correlations between the episodic increases of coccolith fluxes and periods of wet deposition of Saharan dust are evident from the trap data [Ziveri *et al.*, 2000]. This relation has been explained by the fertilization of the sea with inorganic phosphorus, which is known to be the most limiting nutrient [Zohary and Robarts, 1998] controlling *E. huxleyi* production in the eastern Mediterranean. The possibility of episodic phytoplankton blooms triggered by atmospheric deposition of nitrogen, phosphorus and iron has also been pointed out by Guerzoni *et al.* [1999]. A similar relationship has been suggested over geological timescales by Henriksson *et al.* [2000]. The laboratory experiments carried out by Saydam and Senyuva [2002] have provided an independent confirmation that phosphorus and iron are the two most dominant nutrients within Saharan dust particles. For some cases, when dust depositions leads to sufficiently strong fertilization of the surface waters within a reasonably large area, it is possible to identify enhanced *E. huxleyi* production events by the AVHRR satellite imagery in the form of localized high-reflectance

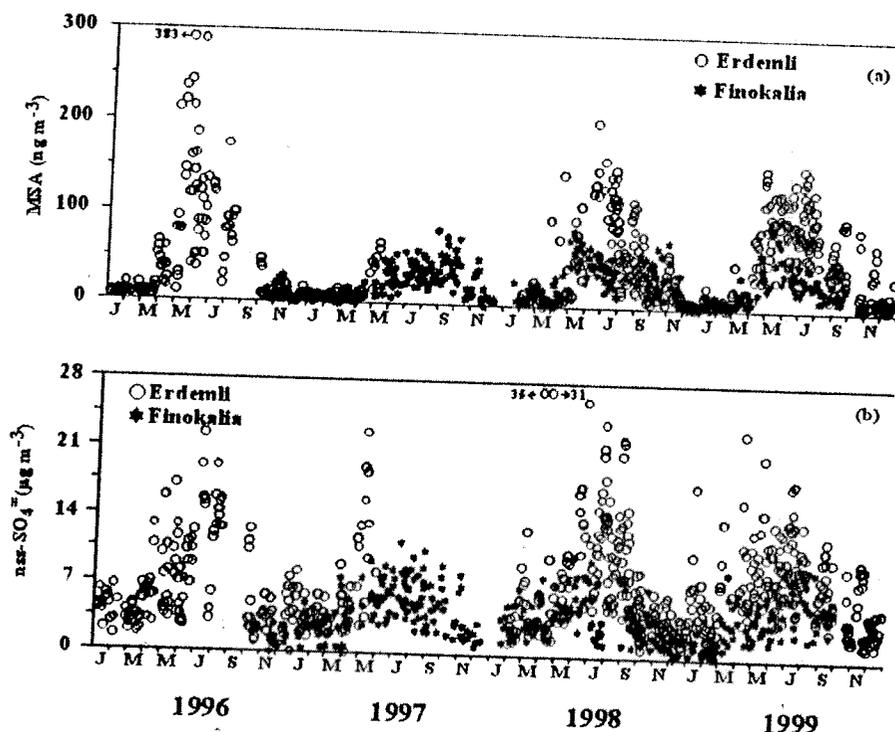


Figure 4. Distributions of (a) aerosol methanesulfonate (MSA in ng m^{-3}) and (b) non-sea-salt (nss) sulfate concentrations (in $\mu\text{g m}^{-3}$) in samples collected during January 1996 to December 1999 at Erdemli (Turkey) and Finokalia (Crete) shown by open circles and solid stars, respectively.

patches [Saydam and Polat, 1999]. In the subsequent sections, we will provide some case studies showing the impacts of such events on the increase of MSA concentrations at Erdemli and Finokalia.

4. Seasonal Variations of MSA and NSS-Sulfate Concentrations

[20] The variations of daily measured MSA and nss-sulfate concentrations during the 4-year period from January 1996 up to the end of 1999 at Erdemli and Finokalia stations are shown in Figure 4. Two important features are immediately noticeable from these data sets: (1) Both indicate a clear signature of seasonal variations, with high summer to low winter values, and (2) the amplitude of variations at Erdemli are almost twice that of those detected at Finokalia. The mean concentrations of MSA over the measurement periods were 44.6 ± 48.5 at Erdemli and 26.5 ± 20.1 ng m^{-3} at Finokalia. The corresponding nss-sulfate concentrations were 6.97 ± 5.08 and 4.08 ± 2.40 $\mu\text{g m}^{-3}$. The presence of high standard deviations in the data, comparable to the mean values, indicates significant short-term variability on the order of a few days to a week, especially during the spring and autumn transitions. The MSA concentrations at Erdemli acquired their peak values of greater than 200 ng m^{-3} in 1996, and around 150 – 200 ng m^{-3} in 1998 and 1999. High concentrations are consistently observed during late May and early June, and are

maintained throughout June and July (Figure 4a). These values are among the highest measured in the world (see Table 1). The peak concentrations during the same months are ~ 75 – 100 ng m^{-3} at Finokalia.

[21] The level of winter-to-summer variations are reduced by 50% when all the data are pooled together to construct a composite, monthly mean annual data set which filters out short term variations. Even in this case, order of magnitude seasonal differences are evident in the data, especially at Erdemli (Figure 5a). The highest Erdemli MSA concentrations of ~ 100 ng m^{-3} occur during June and July. They are almost double those observed in April–May and August–September, which signifies the initiation and termination phases of the enhanced *E. huxleyi* activity in the Black Sea, respectively. The December–January–February concentrations below 10 ng m^{-3} , on the other hand, are the lowest of the year. Instead of a Gaussian type distribution at Erdemli, the MSA concentrations at Finokalia maintain more or less a uniform level of around 40 ng m^{-3} during the June–September period with a slightly higher concentration (~ 50 ng m^{-3}) in May. October and November are the only two months where the monthly mean MSA concentrations of Finokalia (~ 30 ng m^{-3}) exceed those observed at Erdemli (~ 20 ng m^{-3}).

[22] The nss-sulfate concentrations follow similar trends (Figures 4b and 5b). The peak values at Erdemli exceed 20 $\mu\text{g m}^{-3}$ every year; even values up to 35 $\mu\text{g m}^{-3}$ are measured during the summer season (Figure 4b). The

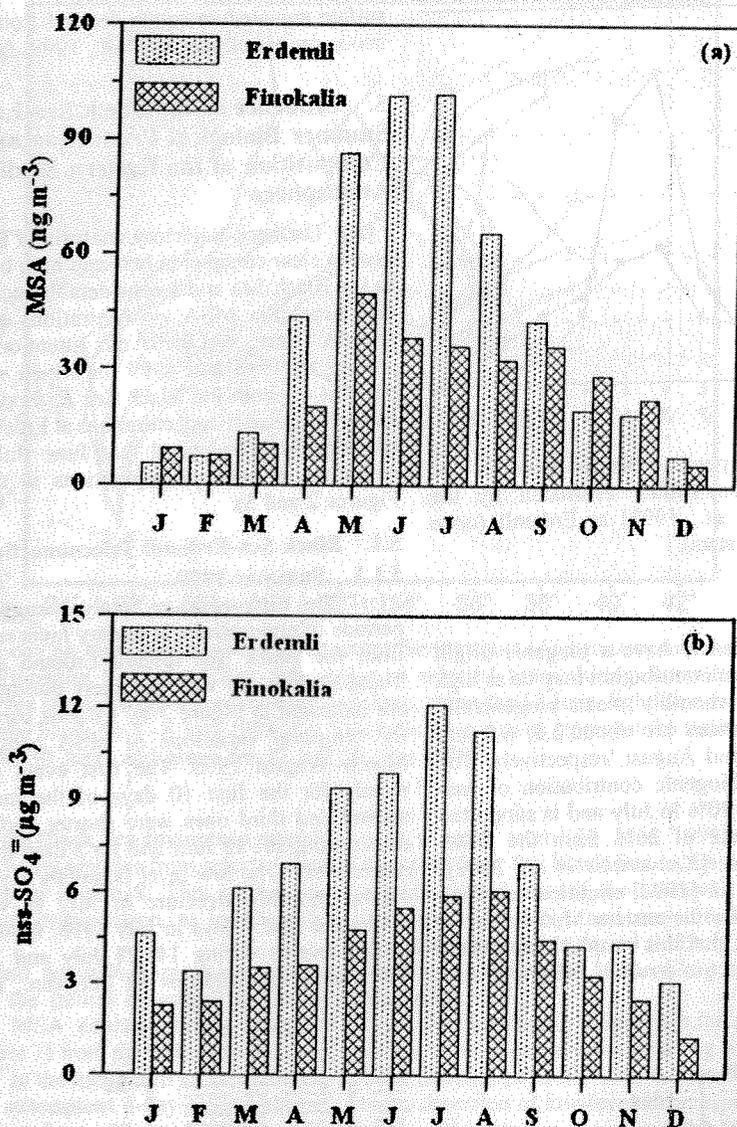


Figure 5. Monthly mean distributions of (a) aerosol methanesulfonate (MSA in ng m^{-3}) and (b) non-sea-salt (nss) sulfate concentrations (in $\mu\text{g m}^{-3}$) at Erdemli (Turkey) and Finokalia (Crete) shown by dotted and hatched bars, respectively. The monthly means are constructed by forming a composite annual data set.

corresponding maximum concentrations, on the other hand, are around $10 \mu\text{g m}^{-3}$ at Finokalia. Once again, the concentrations are approximately halved in the composite, monthly averaged data sets (Figure 5b). From Table 1, it may be noted that the range of values of nss-sulfate concentrations are extremely high when compared with other data sets from different marine regions of the world. The Erdemli mean value of $\sim 7 \mu\text{g m}^{-3}$ exceeds the values of the North Atlantic (Iceland) by almost 3 times, and is 20 times the values at some equatorial open Pacific and Antarctic stations. The monthly averaged MSA to nss-

sulfate percentage varies between a minimum of 0.2% in winter and a maximum of 1.2% in summer for both Erdemli and Finokalia. Such extremely low values throughout the year would suggest additional contributions of nss-sulfate by means of frequent incursions of pollutant air masses from the three continents surrounding the eastern Mediterranean Sea.

[23] Assuming that it can be extrapolated to summer temperatures and coastal marine atmosphere of the eastern Mediterranean, the empirical relation suggested by Bates *et al.* [1992] implies that more than 25% of the measured nss-

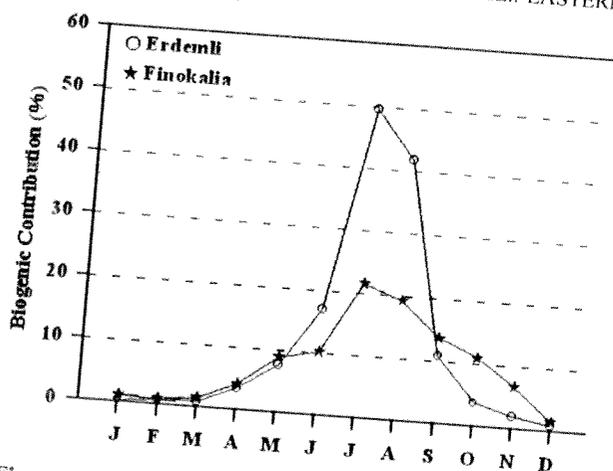


Figure 6. Monthly mean percent distributions for the biogenic contribution of nss-sulfate estimated by the empirical relation [Bates *et al.*, 1992] at Erdemli (open circles) and Finokalia (solid stars).

sulfate at Erdemli is estimated to have a biogenic origin during summer (Figure 6). This contribution may be as high as $\sim 50\%$ during July. The monthly mean biogenically derived nss-sulfate concentrations are about 2.5 , 6.0 and $4.0 \mu\text{g m}^{-3}$ for June, July, and August, respectively. The corresponding value of the biogenic contribution of nss-sulfate at Finokalia is around 20% in July and is supported independently by the estimate of 26% from the DMS measurements at the same site [Kouvarakis *et al.*, 2002]. This implies that the Bates *et al.* [1992] empirical relationship applies reasonably well for the eastern Mediterranean conditions. We note, however, that this simplistic approach may be questionable and subject to errors if MSA and nss-

sulfate are predominantly formed from complex heterogeneous processes [Davis *et al.*, 1999; Legrand *et al.*, 2001].

5. Influence of the Black Sea Late Spring-Summer Biological Production on the Aerosol Composition of the Eastern Mediterranean Atmosphere

[24] The back-trajectory analysis of local air masses suggests a clear connection between high biological production in the Black Sea and a considerable increase in the Erdemli and Finokalia MSA concentrations during the summer months. Here, we focus our attention to the June–July periods of 1998 and 1999 for which we have a common data set for both the Black Sea *E. huxleyi* bloom activities and sulfur aerosol concentrations at Erdemli and Finokalia. It has already been stated that June–July corresponded to maximum *E. huxleyi* populations in the Black Sea (see Figures 2 and 3).

5.1. Black Sea-Erdemli Teleconnection

5.1.1. Summer 1998

[25] The back-trajectory analysis suggested three distinct periods of atmospheric boundary layer meridional transport from the Black Sea toward Erdemli during June 1998. These periods, as well as others during July and August, are indicated in Figure 7 by hatched bars superimposed on the temporal variations of MSA concentrations during March–August 1998. The first event persisted approximately for the first 10 days of the month, whereas the second and third ones were shorter and lasted for only 3 days during 16–18 June and for 5 days during 26–30 June, respectively. The low-level boundary layer transport had a similar monthly structure in July as well. It continued during the first 8 days in July 1998, followed by two more weekly events during 14–21 July and 25–31 July 1998 with some interruptions in between. Thus, the overall

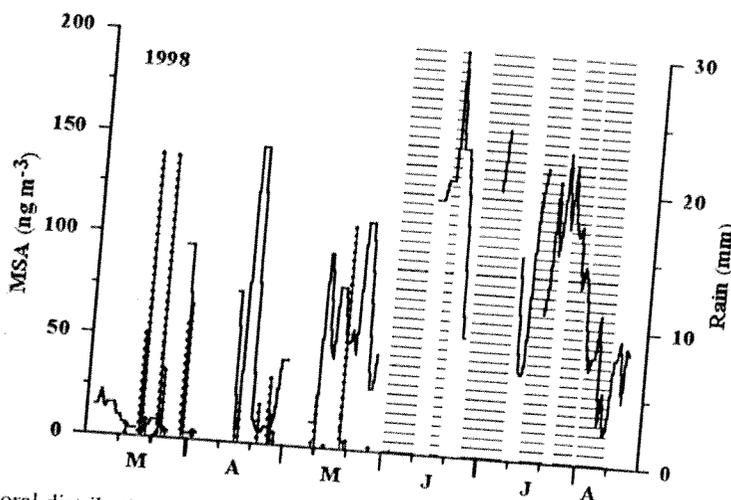


Figure 7. Temporal distribution of aerosol MSA concentrations (solid line) in samples collected during March–August 1998 at Erdemli (Turkey). Daily rain events are indicated by dotted lines. The periods of northerly transports from the Black Sea are shown by hatched bars.

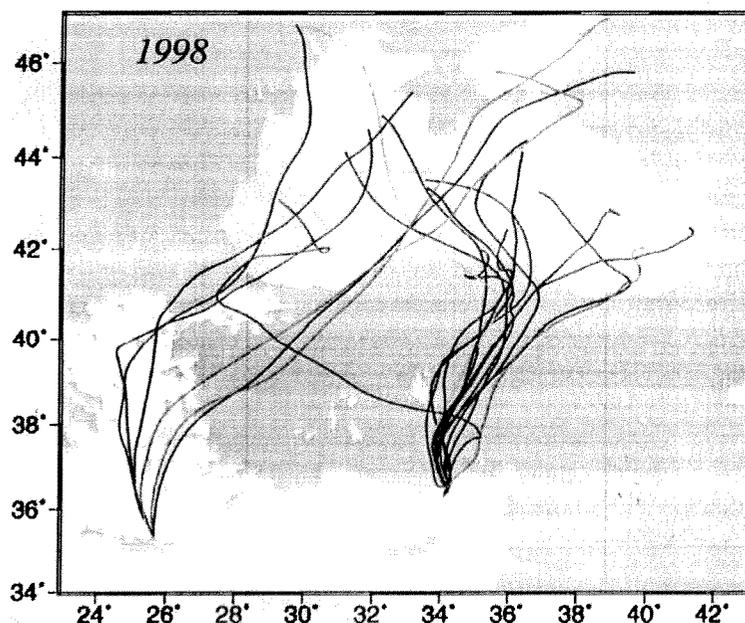


Figure 8. The 3-day air mass back trajectories showing the transport of air masses to the sampling sites at Erdemli and Finokalia from the Black Sea region at selected times during June–July 1998. For Erdemli, blue curves represent the trajectories for 2–6 June, green for 17 June, light blue for 23 June, red for 26–30 June, and black for 1–8 July 1998. For Finokalia, blue curves represent the trajectories for 5–7 June, red for 28–30 June, and green for 22 and 28 July 1998.

duration of transport from the Black Sea amounts to roughly two thirds of this period. The trajectories from selected days of these events are shown in Figure 8. This period was completely dry, without any precipitation, as indicated by the rain data in Figure 7.

[26] June 1998 MSA and nss-sulfate measurements at Erdemli encompass only the period between 12 and 24 June. In this period, the MSA concentrations tended to increase gradually (cf. Figure 7) from the 3-day mean values of ~ 125 and ~ 135 ng m^{-3} to the maximum value of 203 ng m^{-3} during 18 June. The subsequent 3-day mean value of 151 ng m^{-3} was then reduced to ~ 80 ng m^{-3} during the next 3 days, when the transport from the Black Sea was temporarily interrupted (cf. Figure 7). The 13-day mean value for the whole measurement period corresponds to ~ 160 ng m^{-3} . The MSA concentrations of 131 and 162 ng m^{-3} measured during 2–3 July 1998 seem to suggest that such high values also persisted during the last week of June.

[27] Figure 9 shows a specific example for such events on 12 June 1998. The high coccolith accumulations in the Black Sea are shown by the turquoise color relative to the dark blue coverage of the eastern Mediterranean representing the absence of any *E. huxleyi* bloom activity during the same period. As shown in Figure 9, the air mass trajectories link the Black Sea DMS production to high level MSA and nss-sulfate concentrations of 136 ng m^{-3} and 12.2 $\mu\text{g m}^{-3}$, respectively, measured at Erdemli on 16 June 1998. The corresponding values of 47 and 5.1 $\mu\text{g m}^{-3}$ measured at Finokalia do not suggest such an efficient teleconnection mechanism during this particular event. Figure 10 shows the

case a week later (24 June 1998) when the low-level transport from the Black Sea to the measurement sites has already shifted toward the northwest over the continental landmass. The MSA and nss-sulfate concentrations then decreased during this period to 59 ng m^{-3} and 5.1 $\mu\text{g m}^{-3}$, respectively at Erdemli and to 47 ng m^{-3} and 8.4 $\mu\text{g m}^{-3}$ at Finokalia.

[28] It is interesting to note that the reduction in the MSA values to an average value of 47 ng m^{-3} during 8–13 July 1998 matches perfectly with the loss of teleconnection due to the diversion of low-level air transport from northerlies to west-northwesterlies, (i.e., from the Black Sea toward continental Europe), as shown in Figure 7. Once the northerly transport was established again in 14 July, the Black Sea–Erdemli teleconnection brings the MSA concentrations immediately back to their previous level. Their 15-day mean value during the second half of July is ~ 120 ng m^{-3} . Following a gradual reduction of concentrations at the end of July, they remain more or less at a steady level around 40 – 60 ng m^{-3} throughout August 1998. As stated in section 3, this period corresponds to the termination phase of the summer *E. huxleyi* bloom episode, even though some flagellate production might continue to take place within deeper parts of the euphotic zone below the seasonal thermocline.

5.1.2. Summer 1999

[29] According to the air mass trajectory analysis (Figure 9), the teleconnection between the Black Sea and Erdemli is established in summer 1999 during the last week of May, following a 3-week-long transport from the south and



Figure 9. SeaWiFS true color image for 12 June 1998 (Julian day 163) for the Black Sea-Aegean Sea-eastern Mediterranean Sea system. The enhanced *Emiliania huxleyi* bloom activity within the Black Sea is clearly depicted by the turquoise color, in contrast to the rest of the system shown by the dark blue color. Also superimposed on this picture are the 3-day air mass back trajectories for 16-17 June 1998.

southwest over the Sahara and the Mediterranean Sea. A composite of these summer northerly transport events superimposed on temporal variations of MSA concentrations is shown in Figure 12. The northerly transport lasts from 27 May to 9 June. Prior to the northerly transport, the background concentration at Erdemli was around 90 ng m^{-3} . This level of relatively high concentrations should be

maintained due to local production, as will be described in more details in section 6. The MSA concentrations attained a mean value of $\sim 110 \text{ ng m}^{-3}$ during 27 May to 9 June 1999. Following an interruption period of 9-12 June, it persists during the rest of June and within the first half of July 1999 except two more short-term interruption events (Figure 12). The short-term shift in the air mass

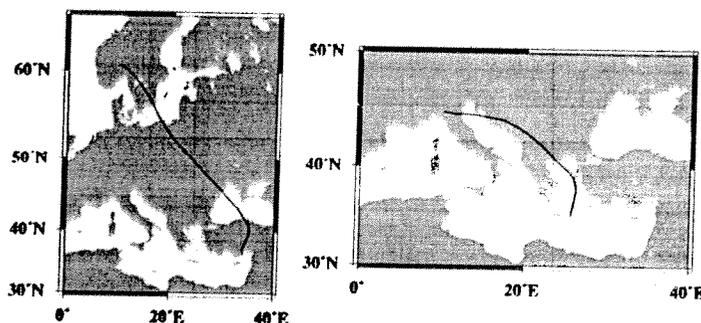


Figure 10. The 3-day air mass back trajectories showing the transport of air masses to the sampling sites at Erdemli (left) and Finokalia (right) from continental Europe on 24 June 1998.

trajectories was immediately seen in the Erdemli MSA concentrations by an almost 50% reduction to 50–60 ng m^{-3} during 9–12 June 1999. A similar reduction was also seen to take place during 18–20 June and 25–27 June as a result of other diversions in the trajectory path from the Black Sea. Otherwise, the MSA concentrations remained around 100–120 ng m^{-3} in June and the first week of July with the highest measured values of $\sim 150 \text{ ng m}^{-3}$ on 21 June and 11–12 July 1999. Following a short interruption of the transport from the Black Sea and subsequent decrease in MSA concentrations during 16–19 July, the teleconnection and higher levels of MSA concentrations persist another week within the second half of July. The Erdemli MSA concentrations increases from ~ 60 to $\sim 110 \text{ ng m}^{-3}$ during this event. Thereafter, as in the case of previous year, the concentrations decrease gradually in August.

5.2. Black Sea-Finokalia Teleconnection

[30] The air mass back-trajectory analyses at Finokalia indicated that low level air transport dominated preferentially from the Western Mediterranean during May–July 1998 and 1999. Finokalia was therefore not affected to the same degree by the Black Sea biogenic transport as Erdemli. During 1998, the teleconnection with the Black Sea is established only occasionally during 8–14 May, 4–7 June, 27 June to 2 July, and 19–31 July (Figure 8). Following the relatively lower values of $\sim 30 \text{ ng m}^{-3}$ during 1–3 June, the MSA concentrations increased to the mean value of 62 ng m^{-3} during the 4–7 June transport event. Thereafter, they decreased slightly to the mean value of $\sim 45 \text{ ng m}^{-3}$ during the rest of June, except with a slight increase to $\sim 55 \text{ ng m}^{-3}$ during the week teleconnection event of late June–early July. The rest of July 1998 is characterized by MSA concentrations of less than 30 ng m^{-3} .

[31] The northerly air mass trajectories were also observed occasionally during 7–11, 14–17, and 26–27 June 1999 and 5–9, 12–14, and 17–20 July 1999 (Figure 11). The first two events in June ensured MSA concentrations above 50 ng m^{-3} with a maximum value of 80 ng m^{-3} being measured on 7 July 1999. The MSA concentrations typically varied between 20 and 30 ng m^{-3} during the rest of June and early July with some occasional daily values up to 40 ng m^{-3} . Two peak values of 74 and 81 ng m^{-3} measured during 12 and 20

July coincided with short-term episodic transports from the Black Sea.

[32] The air mass trajectory analysis for Erdemli and Finokalia therefore points to an unprecedented influence of Black Sea biological production on the eastern Mediterranean sulfur budget. This interaction allows us to provide a more definitive interpretation for the causes of temporal and spatial variabilities observed in the summer MSA measurements of the eastern Mediterranean. The fact that the Finokalia site is not influenced by air masses from the Black Sea as frequently as the Erdemli site would explain its relatively lower observed concentrations during the summer months.

6. Contribution of Saharan Dust Events to Oceanic Production of Atmospheric Sulfur

[33] The contribution of Saharan-based aeolian supply of nutrients on the generation of the toxic dinoflagellate *Gymnodinium breve* blooms along the west Florida shelf and the eastern Gulf of Mexico has been recently reported by Walsh and Steidinger [2001] and Lenex *et al.* [2001]. Our analysis of the data during spring months of 1998 and 1999 also seems to suggest contribution of Saharan-based aeolian supply to increase in the MSA concentrations of the eastern Mediterranean atmosphere. Their link is established by temporal enhancement of DMS production of the eastern Mediterranean surface layer through its fertilization by wet deposition of phosphate, iron, and other nutrients supplied during these dust transports events.

[34] Two sets of 3-day back trajectories shown in Figure 13a indicate that the entire eastern parts of the eastern Mediterranean Sea are influenced by two simultaneous Saharan dust transport events during the first half of May 1998. The Saharan dust supply, commenced at the beginning of the month (implied by similar back trajectories as in Figure 13a), is deposited eventually over the basin as indicated by precipitation monitored at the local meteorological station near the Erdemli site during 9 and 10 May 1998 (cf. Figure 7). The precipitation should affect different areas of the basin at different time intervals and therefore should lead to a longer period of deposition of dust particles with a subsequent increase in phytoplankton production.

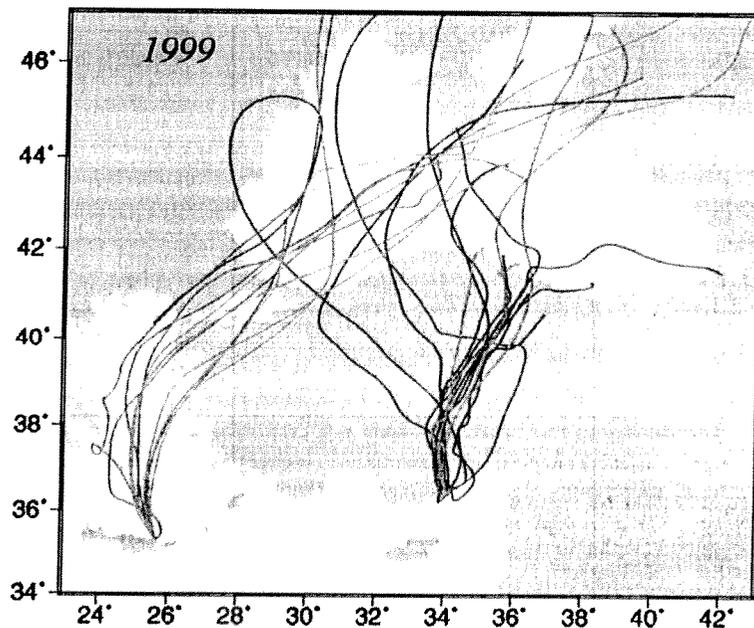


Figure 11. Same as Figure 8 except for June–July 1999. For Erdemli, red curves represent the trajectories for 28–30 May, blue for selected days during 1–29 June, and green for 5–14 July 1999. For Finokalia, violet curves represent the trajectories for 7, 9, 14, 17, and 26 June, and yellow for 6, 9, 14, 17, and 19 July 1999.

These sequences of events are seen in an abrupt increase in MSA concentrations from $\sim 10\text{--}20\text{ ng m}^{-3}$ measured during the first 10 days of May to 60 ng m^{-3} at Finokalia and 95 ng m^{-3} at Erdemli during 11 May 1998 (cf. Figure 7). The next event took place a week later. Following the precipitation recorded at Erdemli during 18–20 May, the MSA concentrations increased even further to 72 ng m^{-3} at Finokalia and 111 ng m^{-3} at Erdemli during 22–23 May

1998. The precipitation seemed to have a temporally adverse effect on sulfur aerosols by reducing their concentrations via wet deposition scavenging. For example, the 3-day mean MSA concentrations of 79 ng m^{-3} during 15–17 May prior to the precipitation event at Erdemli decreased to the mean value of 55 ng m^{-3} at the time of the precipitation event (18–20 May), and then increased to the 3-day mean value of 111 ng m^{-3} during 22–24 May 1998 (cf. Figure 7).

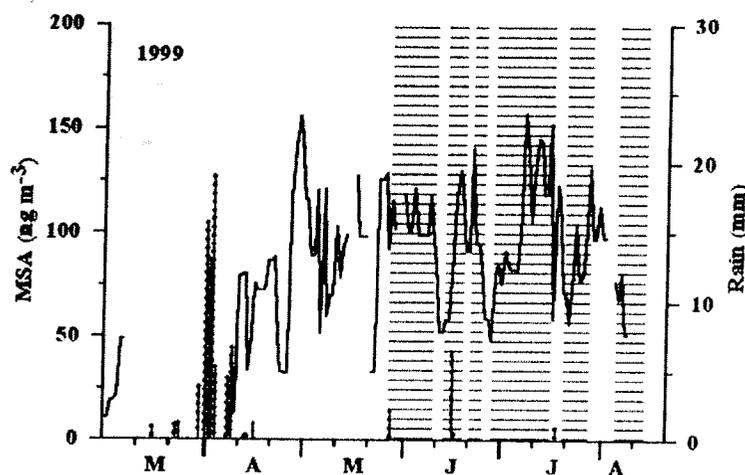


Figure 12. Temporal distribution of aerosol MSA concentrations (continuous line) in samples collected during March–August 1999 at Erdemli (Turkey). Daily rain events are indicated by dotted lines. The periods of northerly transports from the Black Sea are shown by hatched bars.

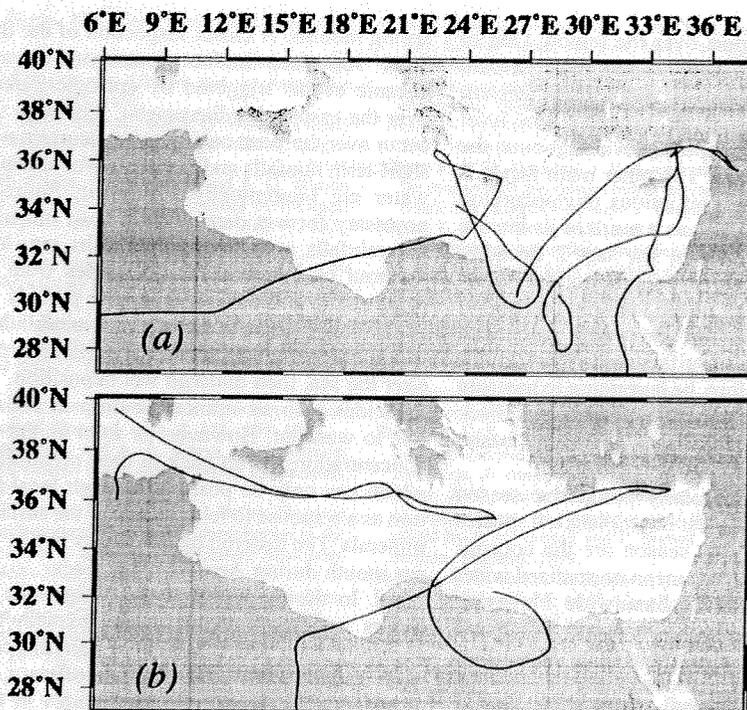


Figure 13. The 3-day air mass back trajectories suggesting Saharan-originated mineral dust transport to the sampling sites at Erdemli and Finokalia with long fetch over the eastern Mediterranean Sea during (a) 11 and 17 May 1998 and (b) 18 and 27 April 1999.

A similar event was also observed to take place in April 1998 at Erdemli. The MSA concentrations, which had already elevated to 74 ng m^{-3} during 13–14 April, have reduced sharply to the mean value of 10 ng m^{-3} during 15–16 April at the time of precipitation, and then increased to a mean value of 145 ng m^{-3} within the next 3 days.

[35] Depending on the direction of air masses across the eastern Mediterranean Sea and patchiness of precipitation associated with local meteorological conditions, the Saharan-derived production will exhibit some variability over the basin. Figure 13b shows an example for a dust transport and deposition event during April 1999 that increases the MSA concentrations only at Erdemli, while the Cretan side remains unaffected. Following the dust transport during the first week of April 1999 and subsequent wet deposition on 7–8 April, the Erdemli MSA concentrations reduced first to 12 ng m^{-3} then increased up to 79 ng m^{-3} during 9–11 April (cf. Figure 12). As the Saharan-based dust transport continued to affect the Levantine basin, the next rain event reduced the MSA concentrations temporarily to 33 ng m^{-3} during 13–14 April. The concentrations then increased to a mean value of 72 ng m^{-3} during 16–18 April, and 87 ng m^{-3} during the following 3 days (cf. Figure 12). The corresponding MSA concentrations at Finokalia during the same period, on the other hand, were not more than 20 ng m^{-3} . They increased gradually to $\sim 150 \text{ ng m}^{-3}$ during 27–29 April at Erdemli, while the Finokalia concentrations did not exceed $30\text{--}40 \text{ ng m}^{-3}$ during the same time period. In addition to poor local production, the Finokalia

site does not receive marine originated sulfur aerosols from the western basin due to its poor biological productivity.

7. Summary and Conclusions

[36] The present work reports for the first time the results from a 4-year-long time series on MSA and nss-sulfate concentrations in the easternmost part of the eastern Mediterranean. The origin of unexpectedly high sulfate aerosol productions over this very poor productive sea is elucidated. Our analyses are based on the measurements at two coastal sites, one located near Erdemli, along the Mediterranean coast of Turkey, representative of the northeastern part of the Levantine basin of the eastern Mediterranean, and the other located on the island of Crete, almost 1000 km west of Erdemli, representative of the western basin of the eastern Mediterranean. These data sets are complemented by SeaWiFS time series data in order to relate their temporal variations to biological production in the region. Air mass back-trajectory analyses was also used to explain these variations in terms of local versus remote biogenic sources.

[37] The measurements at Erdemli suggest high ($>150 \text{ ng m}^{-3}$) MSA concentrations during June–July of each year. Even monthly mean values of $\sim 100 \text{ ng m}^{-3}$ obtained from the composite data set exceed many of those measured globally. The corresponding biogenically derived monthly mean nss-sulfate concentrations are ~ 2.5 , 6.0 , and $4.0 \mu\text{g m}^{-3}$ for June, July, and August. Again, high values detected suggest a very efficient ocean-atmosphere coupling of the

sulfur cycling and lateral transport over the region. One of the key factors contributing to such high sulfate aerosol concentrations over the northeastern part of the eastern Mediterranean is the persistence of northerly low-level boundary layer atmospheric transport prevailing over the region during the summer months. The other main factor is the presence of high and almost continuous phytoplankton production over the entire Black Sea as a result of its intense eutrophication that developed within the last 2 decades. DMS-producing species (such as coccolithophorids, flagellates, etc.) constitute a major part of the total phytoplankton community. Therefore the Black Sea serves as a year-round active source for the generation of sulfate aerosols within its atmosphere. It would not, therefore, be surprising to measure higher MSA and nss-sulfate concentrations over the Black Sea when compared to the northeastern Levantine basin. However, no such measurements are yet available.

[38] The summer is not a particularly productive season for the Black Sea. The most abundant phytoplankton species prone to sulfate production in this season are the coccolithophorids *E. huxleyi*. The SeaWiFS mean normalized water leaving radiance data suggests its basinwide blooming within the surface mixed layer during June and July every year. This activity is further complemented by subsurface flagellate production below the seasonal thermocline. The low-level meridional atmospheric transport therefore carries sulfate aerosols, generated as a byproduct of summer biological production, over Anatolia into the marine atmosphere of the northern Levantine Sea. This process occurring approximately from the end of May to the end of September. However, the western basin of the eastern Mediterranean around the island of Crete does not receive sulfate containing aerosol from the remote Black Sea. The peculiar regional atmospheric circulation systems over the Black Sea-Aegean Sea-eastern Mediterranean Sea region can only sustain approximately half of the lateral aerosol flux supplied to the northeastern Levantine basin. In the summer months, the total absence of precipitation ensures that there are no losses through wet depositions. The region is also usually characterized by weak winds. Sulfate aerosol concentrations can therefore be present at high levels during the summer months. More time series measurements at additional sites between Erdemli and Finokalia are needed to more precisely resolve the spatial variability.

[39] The lateral aerosol supply from the Black Sea terminates after September as the direction of low level air transport is shifted preferentially to westerlies during the autumn and winter months. As both the eastern Mediterranean (the local source) and the Western Mediterranean (the remote source) do not possess any appreciable biogenic production during these seasons, the MSA and biogenically derived nss-sulfate concentrations remain at their lowest concentrations both at Erdemli and Finokalia. The estimated biologically derived nss-sulfate concentrations are negligible from October to April, while the presence of more than $3 \mu\text{g m}^{-3}$ monthly averaged total nss-sulfate concentrations suggests substantial aerosol supply from anthropogenic sources of continental Europe.

[40] The data reveal considerable short-term variability (weekly) in the MSA and nss-sulfate concentrations during

spring months. A closer inspection of the data suggests that these variations in fact correspond to atmospheric and oceanic events triggered by episodic Saharan dust storms over the eastern Mediterranean. Although such storms may occur over the year, only those concurrent with sufficient but short-term rainfalls and dissolution of aeolian nutrients in the water are biogenically important. Short-term rainfall is necessary for wet deposition of dust minerals; longer duration rainfalls, as in the winter months, may lead to a complete washout of sulfate aerosol particles from the atmosphere. April–May is the most favorable periods for such events. When the MSA, air trajectory, and rainfall data are evaluated, it is apparent that Saharan dust particles are first transported over the sea, then undergo wet deposition. The rainy period coincides with an immediate drop in MSA concentrations due to washout. However, as soon as the rain stops, MSA concentrations revert back to their prerinfall concentration, which can only be possible through local biogenic production as a response to fertilization of the surface waters by dust minerals. The Erdemli data suggests two or three such events per month during April–May periods.

[41] In the current study, we highlight a series of processes working concurrently to explain the variations of aerosol sulfate concentrations within the eastern Mediterranean atmosphere. As the region offers a relatively closed system with a very strong signatures in the ocean-atmosphere sulfate cycling, it may serve as an ideal environment to carry out more detailed interdisciplinary studies to understand the details of the many processes of global importance controlling the functioning of the sulfate cycling from oceanographic, atmospheric, and climatic perspectives.

[42] **Acknowledgments.** This study was funded by Middle East Technical University (METU), AFP-2001-07-01-01 Project, the Turkish Scientific and Technical Research Council (TUBITAK), 100Y121 Project, the World Meteorological Organization (WMO) through special service agreements between WMO and N. Kubilay (5.115/A/CNS and 18.637/A/CNS), and the EU project ADIOS (EVK3-CT-2000-00035). It is a contribution to the Black Sea-ODBMS Project sponsored by the NATO Science for Peace Program. Mustafa Koçak benefited from a research fellowship of START to work at the University of Crete. Nikos Mihalopoulos acknowledges the travel support provided by TUBITAK during his visit to Erdemli. We thank Emin Özsoy for making available the ECMWF trajectory analyses through collaboration with the Turkish State Meteorological Office. We would also like to thank Dennis Savoie for compiling the data set used in Table 1. The SeaWiFS Project, and the Distributed Active Archive Center at the Goddard Space Flight Center, are thanked for the production and distribution of the data. The comments by two anonymous reviewers were helpful to clarify several points in the manuscript.

References

- Azov, Y., Eastern Mediterranean: A Marine desert?, *Mar. Poll. Bull.*, 23, 225–232, 1991.
- Baboukas, E. D., M. Kanakidou, and N. Mihalopoulos, Carboxylic acids in gas and particulate phase above the Atlantic Ocean, *J. Geophys. Res.*, 105, 14,459–14,471, 2000.
- Balopoulos, E., et al., A synthesis of preliminary results from multidisciplinary oceanographic studies in the South Aegean Sea and the straits of Cretan Arc (abstract), paper presented at Second Workshop of the Mediterranean Target Project, sponsor, Crete, Greece, 1996.
- Bates, T. S., J. A. Calhoun, and P. K. Quinn, Variations in the methane-sulfonate to sulfate molar ratio in submicrometer marine aerosol particles over the south Pacific ocean, *J. Geophys. Res.*, 97, 9859–9865, 1992.
- Benli, H., Investigation of plankton distribution in the southern Black Sea and its effect on particle flux, in *Particle Flux in the Ocean*, edited by E. T.

- Degens, E. İzdar, and S. Honjo. *Mitt. Geol. Palaeontol. Inst. Univ. Hamburg*, 62, 77-87, 1987.
- Burgermeister, S., and H. W. Georgii. Distribution of methanesulfonate, nss-sulfate and dimethylsulfide over the Atlantic and the North Sea. *Atmos. Environ., Part A*, 25, 587-595, 1991.
- Charlson, R. J., J. E. Lovelock, M. O. Andreae, and S. G. Warren. Oceanic phytoplankton, atmospheric sulphur, cloud albedo and climate: A geophysiological feedback. *Nature*, 326, 655-661, 1987.
- Charlson, R. J., J. Longner, H. Rodhe, C. B. Leavy, and S. G. Warren. Perturbation of the Northern Hemisphere radiative balance by backscattering from anthropogenic sulphate aerosols. *Tellus, Ser. AB*, 43, 152-163, 1991.
- Çokacı, T., N. Kubilay, and T. Oguz. Structure of *E. huxleyi* blooms in the Black Sea surface waters as detected by SeaWiFS imagery. *Geophys. Res. Lett.*, 28, 4607-4610, 2001.
- Davis, D., et al. Dimethyl sulfide oxidation in the equatorial Pacific: Comparison of model simulations with field observations for DMS, SO₂, H₂SO₄(g), MSA(g), MS, and NSS. *J. Geophys. Res.*, 104, 5765-5784, 1999.
- Dugdale, R. C., and F. P. Wilkerson. Nutrient sources and primary production in the Eastern Mediterranean. *Oceanol. Acta*, 9, 179-184, 1988.
- Eker, E., L. Georgieva, L. Senichkina, and A. E. Kideys. Phytoplankton distribution in the western and eastern Black Sea in spring and autumn. *ICES J. Mar. Sci.*, 56, 15-22, 1999.
- Ganor, E., H. A. Foner, H. G. Bingemer, R. Udisti, and I. Setter. Biogenic sulphate generation in the Mediterranean Sea and its contribution to the sulphate anomaly in the aerosol over Israel and the Eastern Mediterranean. *Atmos. Environ.*, 34, 3453-3462, 2000.
- Guerzoni, S., et al. The role of atmospheric deposition in the biogeochemistry of the Mediterranean Sea. *Prog. Oceanogr.*, 44, 147-190, 1999.
- Hay, B. J., and S. Honjo. Particle deposition in the present and Holocene Black Sea. *Oceanography*, 2, 26-31, 1989.
- Henriksson, A. S., M. Samthain, G. Eginton, and J. Poynter. Dimethylsulfide production variations over the past 200 k.y. in the equatorial Atlantic: A first estimate. *Geology*, 28, 499-502, 2000.
- Hjellbrekke, A.-G., Data report 1998, Part 1, Annual summaries. *EMEP/CCC Rep. 3/2000*, Norw. Inst. for Air Res., Kjeller, Norway, 2000.
- Humborg, C., V. Ittekkot, A. Cociasu, and B. v. Bodungen. Effect of Danube River dam on Black Sea biogeochemistry and ecosystem structure. *Nature*, 386, 385-388, 1997.
- Knappertsbuch, M., Geographic distribution of living and Holocene coccolithophores in the Mediterranean Sea. *Mar. Micropaleontol.*, 21, 219-247, 1993.
- Kouvarakis, G., and N. Mihalopoulos. Seasonal variation of gaseous dimethylsulfide and sulfur species in aerosol phase in the Eastern Mediterranean atmosphere. *Atmos. Environ.*, 36, 929-938, 2002.
- Kouvarakis, G., K. Tsigaridis, M. Kanakidou, and N. Mihalopoulos. Temporal variations of surface regional background ozone over Crete Island in southeast Mediterranean. *J. Geophys. Res.*, 105, 4399-4407, 2000.
- Kouvarakis, G., H. Bardouki, and N. Mihalopoulos. Sulfur budget above the eastern Mediterranean: Relative contribution of anthropogenic and biogenic sources. *Tellus, Ser. B*, 54, 201-212, 2002.
- Kubilay, N., S. Nickovic, C. Moulin, and F. Dulac. An illustration of the transport and deposition of mineral dust onto the eastern Mediterranean. *Atmos. Environ.*, 34, 1293-1303, 2000.
- Legrand, M., J. Sciare, B. Jourdain, and C. Genthon. Subdaily variations of atmospheric dimethylsulfide, dimethylsulfoxide, methanesulfonate, and non-sea-salt sulfate aerosols in the atmospheric boundary layer at Dumont d'Urville (coastal Antarctica) during summer. *J. Geophys. Res.*, 106, 14,409-14,422, 2001.
- Lenes, J. M., B. P. Darrow, C. Cattrall, C. A. Heil, M. Callahan, G. A. Vargo, and R. H. Byrne. Iron fertilization and the Trichodesmium response on the west Florida shelf. *Limnol. Oceanogr.*, 46(6), 1261-1277, 2001.
- Luria, M., B. Lifschitz, and M. Peleg. Particulate sulfate levels at a rural site in Israel. *J. Atmos. Chem.*, 8, 241-250, 1989.
- Mankovsky, V. I., V. L. Vladimirov, E. I. Afonin, A. V. Mishonov, M. V. Solovov, B. E. Anninskiy, L. V. Georgieva, and O. A. Yunev. Long-term variability of the Black Sea water transparency and factors determined its strong decrease in the late 1980s, early 1990s, technical report, 32 pp., Mar. Hydrophys. Inst., Sevastopol, Ukraine, 1996.
- Mihalopoulos, N., E. Stephanou, M. Kanakidou, S. Pilitsidis, and P. Bousquet. Tropospheric aerosol ionic composition in the eastern Mediterranean region. *Tellus, Ser. B*, 49, 1-13, 1997.
- Moncheva, S., G. Stereva, A. Krastev, N. Bodeanu, A. Kideys, and S. Bayraktar. Vertical distribution of summer phytoplankton in the western Black Sea during 1991-1995 with respect to some environmental factors, in *NATO TU-Black Sea Project: Ecosystem Modeling as a Management Tool for the Black Sea*, edited by L. Ivanov and T. Oguz, pp. 327-350, Kluwer Acad., Norwell, Mass., 1998.
- Napolitano, E., T. Oguz, P. Malonette-Rizzoli, A. Yılmaz, and F. Sansone. Simulations of biological production in the Rhodes and Ionian basins of the eastern Mediterranean. *J. Mar. Syst.*, 24, 277-298, 2000.
- Nezlin, N. P. Unusual phytoplankton bloom in the Black Sea during 1998-1999: Analysis of remotely sensed data. *Oceanology*, 41, 375-380, 2000.
- Oguz, T., H. W. Ducklow, J. E. Purcell, and P. Malonette-Rizzoli. Modeling the response of top-down control exerted by gelatinous carnivores on the Black Sea pelagic food web. *J. Geophys. Res.*, 106, 4543-4564, 2001.
- Oguz, T., A. G. Deshpande, and P. Malonette-Rizzoli. The role of mesoscale processes controlling biological variability in the Black Sea coastal waters: Inferences from SeaWiFS-derived surface chlorophyll field. *Cont. Shelf Res.*, 22, 1477-1492, 2002.
- Özsoy, T., C. Saydam, N. Kubilay, and I. Salihoğlu. Aerosol nitrate and non-sea-salt sulfate over the eastern Mediterranean. *Global Atmos. Ocean Syst.*, 7, 185-227, 2000.
- Psarra, S., A. Tselipides, and L. Ignatiades. Primary productivity in the oligotrophic Cretan Sea (NE Mediterranean): Seasonal and interannual variability. *Prog. Oceanogr.*, 46, 187-204, 2000.
- Saltzman, E. S., D. L. Savoie, J. M. Prospero, and R. G. Zika. Methanesulfonic acid and non-sea-salt sulfate in Pacific air: Regional and seasonal variations. *J. Atmos. Chem.*, 4, 227-240, 1986.
- Saydam, A. C., and I. Polat. The impact of Saharan dust on the occurrence of algae bloom, in *Proceedings of the EUROTRAC Symposium '98*, edited by P. M. Borrell and P. Borrell, pp. 656-663, WITpress, Southampton, England, 1999.
- Saydam, A. C., and H. Z. Senyuva. Deserts: Can they be the potential suppliers of bioavailable iron?. *Geophys. Res. Lett.*, 29, 1524, doi:10.1029/2001GL013562, 2002.
- Sorokin, Y. I. The Black Sea, in *Estuaries and Enclosed Seas. Ecosyst. World*, vol. 26, edited by B. H. Ketchum, pp. 253-292, Elsevier Sci., New York, 1983.
- Sur, H. I., E. Özsoy, and Ü. Ünlüata. Boundary current instabilities, upwelling, shelf mixing and eutrophication processes in the Black Sea. *Prog. Oceanogr.*, 33, 249-302, 1994.
- Tekiroglu, E., V. Ediger, S. Yemenicioğlu, S. Kapur, and E. Akça. The experimental analysis on the late quaternary deposits of the Black Sea. *Oceanol. Acta*, 24, 51-67, 2001.
- Uysal, Z., A. E. Kideys, L. Senichkina, L. Georgieva, D. Altukhov, L. Kuzmenko, L. Manjos, E. Mutlu, and E. Eker. Phytoplankton patches formed along the southern Black Sea coast in spring and summer 1996, in *NATO TU-Black Sea Project: Ecosystem Modeling as a Management Tool for the Black Sea*, edited by L. Ivanov and T. Oguz, pp. 151-162, Kluwer Acad., Norwell, Mass., 1998.
- Walsh, J. J., and K. A. Steidinger. Saharan dust and Florida red tides: The cyanophyte connection. *J. Geophys. Res.*, 106, 11,597-11,612, 2001.
- Wylie, D. J., and S. J. de Mora. Atmospheric dimethylsulfide and sulfur species in aerosol and rainwater at a coastal site in New Zealand. *J. Geophys. Res.*, 101, 21,041-21,049, 1996.
- Yacobi, Y. Z., T. Zohary, N. Kress, A. Hecht, R. D. Robarts, M. Waiser, A. M. Wood, and W. K. W. Li. Chlorophyll distribution throughout the southeastern Mediterranean in relation to the physical structure of the water mass. *J. Mar. Syst.*, 6, 179-189, 1995.
- Yılmaz, A., O. A. Yunev, V. I. Vedemikov, S. Moncheva, A. S. Bologa, A. Cociasu, and D. Ediger. Unusual temporal variations in the spatial distribution of chlorophyll-a in the Black Sea during 1990-1996, in *NATO TU-Black Sea Project: Ecosystem Modeling as a Management Tool for the Black Sea*, edited by L. I. Ivanov and T. Oguz, pp. 105-120, Kluwer Acad., Norwell, Mass., 1998.
- Zaitsev, Y., and V. Mamaev. *Marine Biological Diversity in the Black Sea: A Study Of Change And Decline*. *Black Sea Environ. Ser.*, vol. 3, 208 pp., U.N., New York, 1997.
- Ziveri, P., A. Rutten, G. J. de Lange, J. Thomson, and C. Corselli. Present-day coccolith fluxes in central eastern Mediterranean sediment traps and surface sediments. *Palaeogeogr. Paleoclimatol. Palaeoecol.*, 158, 175-195, 2000.
- Zohary, T., and R. D. Robarts. Experimental study of microbial P limitation in the eastern Mediterranean. *Limnol. Oceanogr.*, 43, 387-395, 1998.

T. Çokacı, M. Koçak, N. Kubilay, and T. Oguz, Institute of Marine Sciences, Middle East Technical University, P.K. 28 Erdemli, İcel 33731, Turkey. (kubilay@ims.metu.edu.tr; oguz@ims.metu.edu.tr)
G. Kouvarakis and N. Mihalopoulos, Environmental Chemical Processes Laboratory, Department of Chemistry, University of Crete, P.O. Box 1470, 71409 Heraklion, Greece. (Kouvarak@chemistry.uoc.gr; mihalo@chemistry.uoc.gr)