ANKARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DOKTORA TEZİ

MİLLİ KIZILÖTESİ ATMOSFERİK ARKAPLAN MODELLEME YAZILIMI VE TÜRKİYE KIZILÖTESİ ATMOSFERİK ARKAPLAN MODELİ

Mustafa SİVASLIGİL

FİZİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ANKARA
2013

Her hakkı saklıdır

ÖZET

Doktora Tezi

MİLLİ KIZILÖTESİ ATMOSFERİK ARKAPLAN MODELLEME YAZILIMI VE TÜRKİYE KIZILÖTESİ ATMOSFERİK ARKAPLAN MODELİ

Mustafa SİVASLIGİL

Ankara Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Fizik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Hüseyin SARI

Atmosferik ortamdan kaynaklanan etkiler kızılötesi elektromanyetik spektrumda çalışan elektro-optik algılayıcılar açısından önemli bir performans etkenidir. Bu etkilerin modellenmesi ve algoritmalarının oluşturulması özellikle kızılötesi elektronik harp ve benzeri alanlarda önemli bir yere sahiptir. Kızılötesi uygulamalarda, simülasyonlarda ve hesaplamalarda önemli etkileri olan ortamın, dinamik bir süreklilik olmasından dolayı etkilerinin düşük hata oranlarında (<10%) hesaplanması ve modellenmesi zor ve karmaşıktır. Bu tez kapsamında oluşturulan yazılımlar kızılötesi bölgedeki ortam etkilerinin hesaplanmasına yönelik milli yazılımlar olan "KAAN" ve "ATMSOFT" yazılımlarıdır. KAAN yazılımı atmosferik ortamdaki geçirgenlik, yol ışıması, güneş/ay ışıması, yüzey ışıması ve yüzeyden yansıyan güneş/ay ışıması hesaplamalarının yapıldığı modelleme algoritmalarını içermektedir. ATMSOFT yazılımı ise atmosfer ile yüzey arasındaki etkileşimlerden kaynaklanan kırılma indisi değişimleri ve bunların sonucunda ortaya çıkan atmosferik türbülans etki hesaplamalarının yapıldığı modelleme algoritmalarını içermektedir. KAAN yazılımının doğrulama çalışmaları literatürde yayınlanmış saha ölçümleri verileri kullanılarak yapılmıştır. Aynı zamanda bu doğrulama çalışmaları sırasında MODTRAN 4 yazılımı ile karşılaştırmaya yönelik çalışmalar yapılarak bu tez çalışmasında gösterilmektedir. ATMSOFT yazılımının doğrulama çalışmaları ise Tunick CN2 modeli kullanılarak yapılmıştır. Tunick CN2 modeli literatürde yayınları olan ve doğrulaması açık saha testleri ile yapılmış bir türbülans modelidir. KAAN ve ATMSOFT yazılımı gerçek zamanlı uygulamalara uyumluluğu ve kestirim sonuçlarındaki hata oranlarının düşüklüğü ile birçok yazılımdan ayrılmaktadır. KAAN yazılımı kullanılarak milli atmosfer modellerinin ortaya çıkarılması çalışmaları ve elde edilen sonuçlarla birlikte KAAN ve ATMSOFT yazılımları bu tez kapsamında sunulmaktadır.

Ekim 2013, 102 sayfa

Anahtar Kelimeler: Kızılötesi atmosferik etkiler, Kızılötesi atmosferik arkaplan, Atmosferik geçirgenlik, Kızılötesi ışıma, Atmosferik türbülans, Benzerlik teorisi, Kırılma indisi yapı parametresi.

ABSTRACT

Ph.D. Thesis

NATIONAL INFRARED ATMOSPHERIC BACKGROUND MODELING SOFTWARE AND INFRARED ATMOSPHERIC BACKGROUND MODEL OF TURKEY

Mustafa SİVASLIGİL

Ankara University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Physics Engineering

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Hüseyin SARI

The effects of the atmospheric environment are known as an important factor for the performance of the electro-optical sensors working in the infrared wavelengths of electromagnetic spectrum. Modelling of these effects and developing the modelling algoritms are placed an important role especially in electronic warfare applications and similar fields. Obtaining low error rates (<10%) in modelling and the calculations of the atmospheric effects, which are important factors in infrared applications, simulations and computations, are very difficult and complex issue because of being a dynamic continuum. As a result of this thesis, atmospheric modelling softwares, which are national softwares and named as "KAAN" and "ATMSOFT", in infrared electromagnetic spectrum are developed. KAAN software contains the modelling algoritm of the atmospheric transmission, path radiance, sun/moon irradiance, surface radiance and surface reflected sun/moon radiance calculations. ATMSOFT software contains the modelling algoritm of the index of refraction variations due to the atmosphere-surface relations and resultant atmospheric turbulence effects calculations. The validation studies of KAAN software are done by using the results of the field measurements published in the literature. Furthermore, during these validation studies, comparison studies with MODTRAN 4 software were also done and shown in this work. ATMSOFT software is validated by using Tunick CN2 modelling approach. Tunick CN2 model is a turbulence model which was validated by field measurements and there are several publications about Tunick CN2 model in the literature. KAAN and ATMSOFT softwares are departing from most of the related softwares by the compatibility of the real time applications and low error ratio of the estimation results. This study provides the realization of the national atmospheric background model by using KAAN software and the results of the model together with KAAN and ATMSOFT softwares.

October 2013, 102 pages

Key Words: Infrared atmospheric effects, Infrared atmospheric background, Atmospheric transmission, Infrared radiance, Atmospheric turbulence, Similarity theory, The refractive index structure parameter.

TEŞEKKÜR

Çalışmalarımda ve araştırmalarımın her aşamasında bilgi, öneri ve yardımlarını esirgemeyerek akademik ortamda olduğu kadar beşeri ilişkilerde de engin fikirleriyle yetişme ve gelişmeme katkıda bulunan danışman hocam sayın Doç. Dr. Hüseyin SARI'ya (Ankara Üniversitesi Fizik Mühendisliği), çalışmalarım sırasında önemli katkılarda bulunan ve bilgi, öneri ve yardımlarını esirgemeyen Doç. Dr. Cemil Berin EROL'a, bilimsel çalışmaların yanında her aşamada pratik çözümleriyle, öneri ve yardımlarıyla bir hoca, bir arkadaş ve bir dost olarak destek olan Dr. Türkmen CANLI'ya, çalışmalarım ve araştırmalarımın sonuçlarını sabırla dinleyen, bilgi ve önerilerini esirgemeyen Doç. Dr. Mehmet BAHAT (Gazi Üniversitesi Fizik Bölümü) ve Doç. Dr. Barış AKAOĞLU'na (Ankara Üniversitesi Fizik Mühendisliği), TÜBİTAK BİLGEM İLTAREN Enstitüsü'nde birlikte çalıştığım yakın arkadaşlarıma, çalışmalarım süresince birçok fedakarlıklar göstererek beni destekleyen aileme ve son olarak tezimi ithaf ettiğim babam Osman Arifi SİVASLIGİL'e en derin duygularla teşekkür ederim.

Mustafa SİVASLIGİL
Ankara, Ekim 2013

İÇİNDEKİLER

ÖZET ..... **i**
ABSTRACT ..... **ii**
TEŞEKKÜR ..... **iii**
SİMGELER DİZİNİ ..... **v**
ŞEKİLLER DİZİNİ ..... **vi**
ÇİZELGELER DİZİNİ ..... **viii**
1. GİRİŞ… **1**
2. KURAMSAL TEMELLER **2**
2.1 Elektromanyetik Spektrumda Kızılötesi Bant **2**
2.2 Radyometrinin İlkeleri **4**
2.3 Siyah Cisim Işıması ve Planck Yasası **5**
2.4 Wien Yasası **7**
2.5 Stefan – Boltzmann Yasası **8**
2.6 Lambert Yasası **8**
2.7 Kirchhoff Yasası ve Enerjinin Korunumu **9**
2.8 Atmosferin Optik Özellikleri **9**
2.9 Emilim… **10**
2.10 Saçılma **13**
2.11 Yol Işıması **15**
2.12 Türbülans **16**
2.13 BRDF Modeli **16**
2.14 Işımanın Hesaplanması **18**
3. KIZILÖTESİ ATMOSFERİK ANALİZ YAZILIMI (KAAN) **20**
3.1 Teknik Bilgiler **21**
3.1.1 Atmosferik geçirgenlik **22**
3.1.2 Yol ışıması **27**
3.1.3 Güneşten gelen ışıma **28**
3.1.4 Yüzey ışıması **28**
3.1.5 Yüzeyden yansıyan güneş ışıması **29**
3.1.6 Aydan gelen ışıma **29**
3.1.7 Yüzeyden yansıyan ay ışıması **30**
3.2 Yazılım Girdileri ve Çalışma Prensibi **30**
4. KAAN YAZILIMI DOĞRULAMA ÇALIŞMALARI **37**
5. TÜRKİYE KIZILÖTESİ ATMOSFERİK ARKAPLAN MODELİ **47**
6. ATMOSFERİK TÜRBÜLANS MODELLEME YAZILIMI (ATMSOFT) **62**
6.1 Atmosferik Türbülans **63**
6.2 Mikrometeorolojik Kanal Parametre Kestirimi **64**
6.2.1 Direkt yöntem **65**
6.2.2 Yinelemeli yöntem **66**
6.3 C_n^2 yükseklik profili kestirimi **67**
6.3.1 Bulk (Standart) Model **67**
6.3.2 Tatarski modeli **71**
6.4 Kırpışma Modeli **72**
6.4.1 Sinyal işleme **72**
7. ATMSOFT YAZILIMI ARAYÜZ TANIMLAMALARI **74**
8. ATMSOFT YAZILIMI DOĞRULAMA ÇALIŞMALARI **77**
9. SONUÇ.. ..... **79**
KAYNAKLAR **81**
EK-1 CO2 ve H2O geçirgenlik tablosu **84**
ÖZGEÇMİŞ……....102

KISALTMALAR VE SİMGELER DİZİNİ

KAAN	Kızılötesi Atmosferik Analiz
MODTRAN	MODerate resolution TRANsmission
UV	Mor Ötesi (0.3-0.4 μm)
SWIR	Kısa Dalga Kızılötesi (1-3 μm)
NIR	Yakın Kızılötesi (0.7-1 μm)
MWIR	Orta Dalga Kızılötesi (3-5 μm)
LWIR	Uzun Dalga Kızılötesi (8-12 μm)
PR	Yol Işıması
TSPR	Geçirilen Spektral Yol Işıması
GI	Güneş Işıması
GSGI	Geçirilen Spektral Güneş Işıması
SR	Yüzey Işıması
TSSR	Geçirilen Spektral Yüzey Işıması
EF	Yükselti Etkeni
T	Sıcaklık
λ	Dalgaboyu
τ	Geçirgenlik Katsayısı
ε	Yayınım Katsayısı
R	Yansıma Katsayısı
TSSRSR	Geçirilen Spektral Yüzeyden Yansıyan Güneş Işıması
GF	Geometri Etkeni
MR	Ay Işıması
TSMR	Geçirilen Spektral Ay Işıması
MRR	Aydan Yansıyan Işıma
TTSMR	Toplam Geçirilen Spektral Ay Işıması
TSSRMR	Geçirilen Spektral Yüzeyden Yansıyan Ay Işıması
L	Planck Işıma Fonksiyonu

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1 Elektromanyetik Spektrumda kızılötesi bant 3

Şekil 2.2 Değişik sıcaklıklarda bir siyah cisim yayıcısının spektrumundaki enerji dağılımı……..7

Şekil 2.3 Atmosferden geçen güneş ışığının spektrumu. 11

Şekil 2.4 Atmosferik gazların kızılötesi emilimi. 12

Şekil 2.5 Açık havada elektromanyetik ışınımın atmosferden geçişi. 13

Şekil 2.6 Atmosferik parçacıkların oluşturduğu: a. Rayleigh, b. Mie, c. Geometrik saçılmalar..... 14

Şekil 2.7 Yüzey pürüzünün yansımaya etkisi 17

Şekil 3.1 Eğik yol hesaplamaları..... 27

Şekil 3.2 KAAN yazılımında kullanılan geometri..... 31

Şekil 3.3 KAAN yazılımı akış diyagramı 36

Şekil 4.1 Kentsel kıyı alanı (urban coastal area), kuzeydoğu haifa, orta mesafe ölçümleri..... 37

Şekil 4.2 Kentsel kıyı alanı (Urban Coastal Area), kuzeydoğu haifa, uzun mesafe ölçümleri..... 38

Şekil 4.3 Kırsal ortam (Rural Environment), orta nem durumu için çok uzun mesafe ölçümleri..... 39

Şekil 4.4 Kırsal ortam (Rural Environment), düşük nem durumu için çok uzun mesafe ölçümleri 40

Şekil 4.5 Kırsal Ortam (Rural Environment), Yüksek nem durumu için çok uzun mesafe ölçümleri 41

Şekil 4.6 Akdeniz sularında, uzun mesafe ölçümleri..... 42

Şekil 4.7 Kızıldeniz sularında, uzun mesafe ölçümleri..... 43

Şekil 4.8 Deniz Seviyesinde, Kısa Mesafe Ölçümleri 44

Şekil 4.9 Mitzpe' Ramon (Güney İsrail-Negev) bölgesinde çok uzun mesafe eğik yol durumu ölçümleri 45

Şekil 5.1 Türkiye atmosfer modeli spektral geçirgenlik grafiği 49

Şekil 5.2 Türkiye atmosfer modeli spektral geçirgenlik grafiği 49

Şekil 5.3 Türkiye atmosfer modeli spektral geçirgenlik grafiği 50

Şekil 5.4 Türkiye atmosfer modeli spektral geçirgenlik grafiği 50

Şekil 5.5 Türkiye atmosfer modeli spektral geçirgenlik grafiği 51

Şekil 5.6 Türkiye atmosfer modeli spektral geçirgenlik grafiği 51

Şekil 5.7 Türkiye atmosfer modeli spektral geçirgenlik grafiği 52

Şekil 5.8 Türkiye atmosfer modeli spektral geçirgenlik grafiği 52

Şekil 5.9 Türkiye atmosfer modeli spektral geçirgenlik grafiği 53

Şekil 5.10 Türkiye atmosfer modeli spektral geçirgenlik grafiği 53
Şekil 5.11 Türkiye atmosfer modeli spektral geçirgenlik grafiği 54
Şekil 5.12 Türkiye atmosfer modeli spektral geçirgenlik grafiği 54
Şekil 5.13 Türkiye atmosfer modeli spektral geçirgenlik grafiği 55
Şekil 5.14 Türkiye atmosfer modeli spektral geçirgenlik grafiği 55
Şekil 5.15 Türkiye atmosfer modeli spektral geçirgenlik grafiği 56
Şekil 5.16 Türkiye atmosfer modeli spektral geçirgenlik grafiği 56
Şekil 5.17 Türkiye atmosfer modeli spektral geçirgenlik grafiği 57
Şekil 5.18 Türkiye atmosfer modeli spektral geçirgenlik grafiği 57
Şekil 5.19 Türkiye atmosfer modeli bant geçirgenlik grafiği 58
Şekil 5.20 Türkiye atmosfer modeli bant geçirgenlik grafiği 58
Şekil 5.21 Türkiye atmosfer modeli bant geçirgenlik grafiği 59
Şekil 5.22 Türkiye atmosfer modeli bant geçirgenlik grafiği 59
Şekil 5.23 Türkiye atmosfer modeli bant geçirgenlik grafiği 60
Şekil 5.24 Türkiye atmosfer modeli bant geçirgenlik grafiği 60
Şekil 5.25 Adana için ocak ayı yol ışıması hesaplaması örneği grafiği 61
Şekil 5.26 Adana için ocak ayı güneş ışıması hesaplaması örneği grafiği 61
Şekil 7.1 ATMSOFT Cn2 modeli örnek çıktı formatı 75
Şekil 7.2 FLIR A40 kamerası kullanılarak alınmış ölçümler üzerine örnek Cn2 verileri kullanılarak modellenen sintilasyon etkileri
a. Orijinal ölçüm ve b. atmosferik türbülans etkileri
10^{-12} $m^{-2/3}$ > Cn2 > 10^{-14} $m^{-2/3}$ olacak şekilde modellenmiş veri 76
Şekil 8.1 ATMSOFT (yıldız ve elmas işaretleri) ve Tunick (aşağı doğru üçgen ve çember işaretleri) modelleri için MARIAH ve OKEYPS metodolojileri kullanılarak elde edilen Cn2 kestirim sonuçları……..……..77

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1 Kızılötesi bandın alt bölümleri 3
Çizelge 2.2 Temel Terimler ve Birimler 5
Çizelge 3.1 KAAN Çalışma Frekansları 22
Çizelge 3.2 Doymuş havadaki su buharı kütlesi, g/m^3 24
Çizelge 3.3 Sis durumu için zayıflama katsayısı değerleri 26
Çizelge 3.4 Yağmur durumu zayıflama katsayısı eşitliği sabitleri 26
Çizelge 3.5 Toz bulutu durumu için saçılma katsayısı değerleri 26
Çizelge 3.6 Toz bulutu durumu için yoğunluk değerleri 26
Çizelge 3.7 KAAN girdileri ve girdilerin birimleri, değer aralıkları ve tanımları 32
Çizelge 4.1 KAAN ve MODTRAN sonuçlarının ölçüm verileri ile karşılaştırılması 46

1. GİRİŞ

Bu tez kapsamında yapılan çalışmalar sonucunda kızılötesi bölgedeki ortam etkilerinin hesaplanması amaçlı "KAAN" ve "ATMSOFT" milli yazılımları elde edilmiştir. KAAN yazılımı atmosferik ortamdaki geçirgenlik, yol ışıması, güneş/ay ışıması, yüzey ışıması ve yüzeyden yansıyan güneş/ay ışıması hesaplamalarının yapıldığı modelleme algoritmalarını içermektedir. ATMSOFT yazılımı ise atmosfer ile yüzey arasındaki etkileşimlerden kaynaklanan kırılma indisi değişimleri ve bunların sonucunda ortaya çıkan atmosferik türbülans etkileri hesaplamalarının yapıldığı modelleme algoritmalarını içermektedir. KAAN ve ATMSOFT yazılımı gerçek zamanlı uygulamalara uyumluluğu ve kestirim sonuçlarındaki hata oranlarının düşüklüğü ile bu alanda yer alan birçok yazılımdan ayrılmaktadır. KAAN ve ATMSOFT yazılımları, doğrulama çalışmaları, KAAN yazılımı kullanılarak milli atmosfer modellerinin ortaya çıkarılması çalışmaları ve elde edilen sonuçlar bu tez kapsamında sunulmaktadır.

2. KURAMSAL TEMELLER

Bu çalışmada, elektromanyetik spektrumun kızılötesi bölgesi, atmosferik arkaplanı oluşturan bileşenler, bu bileşenlerin modellenmesi ve hesaplanması ile ilgili kullanılan modelleme yaklaşımları sunulmaktadır.

Kızılötesi sistem analizlerinin en önemli kısmını iz analizleri oluşturmaktadır. Bu nedenle, kızılötesi sistemlerin başarım analizlerinde atmosferik arkaplanı oluşturan tüm bileşenlere ait etkilerin gerçeğe yakın olarak tahmin edilmesi gerekmektedir.

Tezin 2. bölümünde kızılötesi bant hakkında genel bilgiler, formüller ve temel prensipler sunulmuştur. 3. ve 4. bölümlerde sırasıyla, kızılötesi atmosferik etkilerin modelleme algoritmalarının yer aldığı KAAN yazılımı ve KAAN yazılımının doğrulama çalışmaları kapsamında yapılan hesaplamalar ve sonuçlar sunulmaktadır. 5. bölümde KAAN yazılımı kullanılarak yapılmış olan Türkiye kızılötesi atmosferik arkaplan modeli ve hesaplamaları yer almaktadır. 6. ve 7. bölümlerde ise sırasıyla, kızılötesi elektromanyetik spektrumda atmosfer ile yüzey arasındaki etkileşimlerden kaynaklanan atmosferik türbülans etkilerinin modelleme algoritmalarının yer aldığı ATMSOFT yazılımı ve doğrulama çalışmaları kapsamında yapılan hesaplamalar ve sonuçlar anlatılmaktadır. Son bölümde ise elde edilen sonuçlar ve tez kapsamında yapılan çalışmaların sonuçlarının özet şeklinde yorumu yer almaktadır.

2.1 Elektromanyetik Spektrumda Kızılötesi Bant

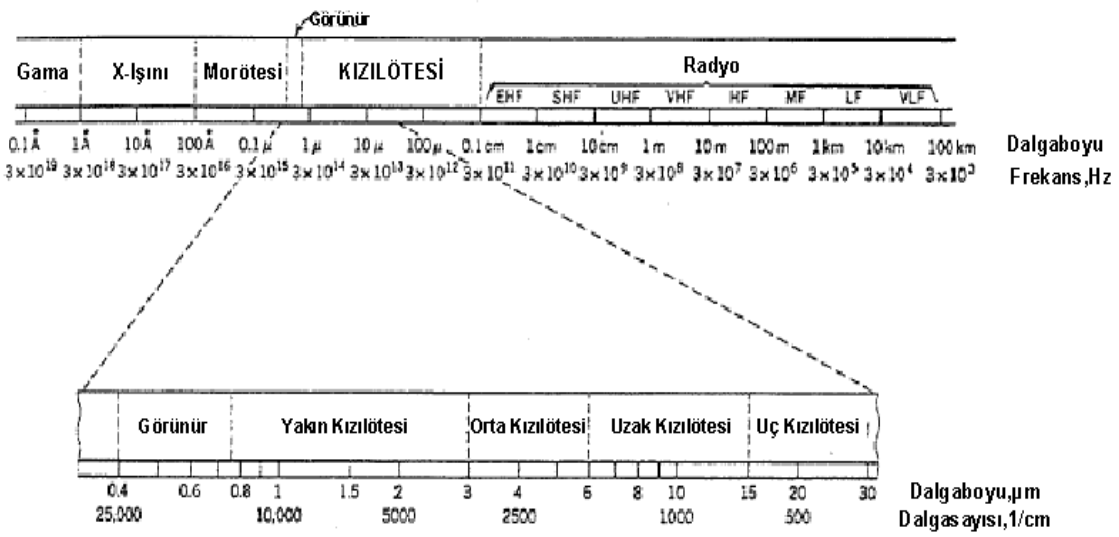
Kızılötesi ışımanın temel kaynağı ısıdır. Sıcaklığı mutlak sıcaklığın (0°K = -273°C) üzerinde olan her cisim kızılötesi ışıma yapmaktadır. Kızılötesi bant, elektromanyetik spektrumda görünür bandın bittiği yerden başlayarak milimetre dalgalarına kadar olan bölgeyi ifade etmektedir, diğer bir tanımla yaklaşık olarak 0,70 μm - 1000 μm dalgaboyu aralığındadır. İlk olarak ünlü astronom Sir William Herschel (1738-1822) 1800'lerin başlarında yazdığı bir dizi makale ile, günümüzde kızılötesi olarak isimlendirilen, bandın varlığından bahsetmiştir (Hudson 1969).

Kızılötesi bant çizelge 2.1'de verildiği gibi genellikle yakın, kısa dalgaboyu, orta dalgaboyu, uzak dalgaboyu ve uç kızılötesi bant olmak üzere beş alt bölgeye ayrılmaktadır. Bir kısım literatürde yakın ve kısa dalgaboyu kızılötesi bantlar bir bütün olarak yakın kızılötesi bandın içerisinde de gösterilebilmektedir.

Çizelge 2.1 Kızılötesi bandın alt bölümleri

Yakın Kızılötesi	0,75 μm – 1 μm
Kısa Dalgaboyu Kızılötesi	1 μm – 3 μm
Orta Dalgaboyu Kızılötesi	3 μm – 5 μm
Uzak Dalgaboyu Kızılötesi	8 μm – 14 μm
Uç Kızılötesi	14 μm – 1 mm

Kızılötesi bandın elektromanyetik spektrumdaki yeri şekil 2.1'de gösterilmektedir.



Şekil 2.1 Elektromanyetik spektrumda kızılötesi bant

Kızılötesi bantta çalışırken frekans ve dalgaboyu terimlerinin yanı sıra 'dalgasayısı' terimi de kullanılmaktadır. Dalgasayısı, ν, ile dalgaboyu, λ arasındaki bağıntı Eşitlik (2.1)'de verilmektedir.

$$\nu = 1/\lambda \tag{2.1}$$

Günümüzde kullanılan cihazlarla dalgaboyu 10^{-7} doğrulukla ölçülebilmektedir. Frekans ise ışık hızındaki belirsizliklerden dolayı 10^{6}'da bir doğrulukla hesaplanabilmektedir. Dalgaboyunun daha yüksek olan doğruluk payını koruyabilmek için birim mesafedeki dalga sayısını ifade eden dalgasayısı terimi ortaya çıkmaktadır. Dalgaboyu santimetre cinsinden ifade edildiğinde dalgasayısının birimi "cm^{-1}" olmaktadır.

2.2 Radyometrinin İlkeleri

Elektromanyetik spektrumun kızılötesi bölgesinde radyometrinin metotları geçerlidir. Radyometri, gelen ışımanın fiziksel ölçüm sistemlerine dayanılarak ölçümüdür. Gelen bu enerji doğrudan ölçülemediğinden, sezimcilerle başka formlara çevrilerek ölçülür. Radyometrik kavramlar bir algılayıcıdaki akı transferini nicel olarak anlayabilmek için gerekmektedir. Bu kavramlar algılayıcı yüzeyinde ne kadar enerji toplandığının anlaşılmasını ve sinyal gürültü oranlarının hesaplanmasını sağlamaktadır.
Radyometrik analizlerde iki önemli kabul yapılmaktadır; (1) kaynaklar faz uyumsuzdur, girişim ihmal edilebilir, (2) kırınım yok sayılmaktadır, elektromanyetik dalga düz çizgiler halinde ilerlemektedir.

İlk olarak açıklanması gereken terim 'katı açı' terimidir, çünkü birçok radyometrik birim katı açı cinsinden ifade edilmektedir. Katı açının birimi steradyan (sr)'dır. Bir steradyan, kürenin alanının bir bölümünün kürenin yarı çapının karesine eşit olduğu durumda elde edilen açı olarak ifade edilir. Steradyan birimindeki katı açının formülü ise,

$$\Omega = \frac{A}{R^2} \tag{2.2}$$

olarak verilmektedir. Formüldeki R kürenin yarıçapını, A ise katı açının gördüğü küresel yüzeyin alanıdır. Tam bir kürenin katı açısı 4π steradyan olarak hesaplanmaktadır.

Enerjinin temel birimi Joule (J)'dür. Birim zamandaki enerji akı veya güç olarak tanımlanır, birimi J/s yani Watt (W)'tır . Diğer bir deyiş ile akı, ışıma gücüdür. Işıma şiddeti (E), bir kaynaktan birim katı açı içine yapılan ışıma akısıdır, birimi W/sr'dır. Yayınım (M), bir kaynağın yarım küre içine birim alandan yaydığı ışıma akısıdır. Gelen ışıma (I) ise geliş yönüne bakmaksızın birim alana ulaşan ışıma akısıdır. Yayınımın ve gelen ışımanın birimi W/m²'dir. Işıma (N), birim alandan, birim katı açı içine yapılan ışıma akısıdır, birimi W/m²/sr'dır. Bununla birlikte, yayınım yapan birim alan yayınım yönü ile normal olacak şekilde izdüşüm olarak alınmalıdır.

Bu tezde kullanılan temel terimler ve birimler çizelge 2.2'de özetlenmektedir. Işıma terimlerinden spektral olarak, yani dalgaboyuna karşılık, bahsedildiğinde terimlerin birimleri μm'ye bölünmektedir.

Çizelge 2.2 Temel terimler ve birimler

TERİM ADI	**BİRİMİ**
Alan (A)	cm^2, m^2
Dalgaboyu (λ)	μm
Dalgasayısı (ν)	cm^{-1}
Düzlem Açı	Rad
Katı Açı (Ω)	Sr
Enerji	J
Akı	W
Işıma Şiddeti (E)	W/sr
Yayınım (M)	W/cm^2, W/m^2
Gelen ışıma (I)	W/cm^2, W/m^2
Işıma (N)	$W/cm^2/sr$, $W/m^2/sr$

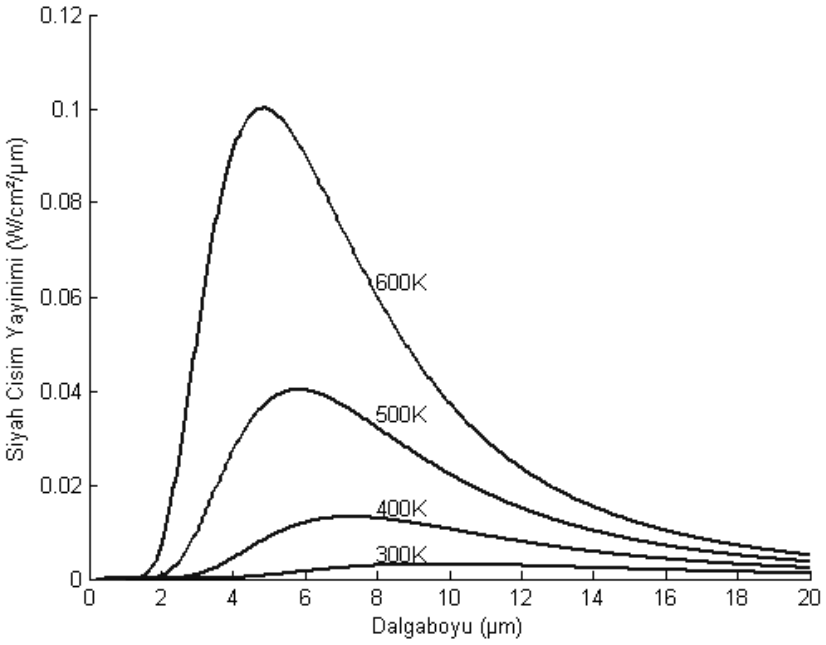
2.3 Siyah Cisim Işıması ve Planck Yasası

Bir cisim çevresiyle ısısal dengede iken elektromanyetik spektrumdaki bir dalgaboyunda ne kadar çok ışınım enerjisi soğurursa aynı dalgaboyunda o kadar çok ışımayla enerji yayınlar, ki bu durum Kirchoff Yasası olarak bilinmektedir. Buna göre iyi bir soğurucu, aynı zamanda iyi bir yayınlayıcıdır. Dalgaboyundan bağımsız olarak üzerine düşen ışınım enerjisinin tümünü soğuran mükemmel soğurucu ve üzerindeki

enerjinin tümünü yayan mükemmel yayıcı, siyah cisim olarak adlandırılmaktadır. Siyah cisim ideal bir cisimdir ve bir çeperinde küçük bir delik bulunan, çevresinden yalıtılmış bir oyuk şeklinde düşünülebilir. Delikten içeri giren ışınım enerjisinin içeride yansıma yaparak tekrar dışarı çıkma olasılığı çok küçüktür. Bu nedenle sözü edilen oyuk hemen hemen mükemmel bir soğurucu gibi davranır. Oyuk ısıtılırsa bu kez de bu oyuk, delikten dışarı enerji yayınlayan bir ışık kaynağı gibi çalışır. Yayınlanan ışınım enerjisinin spektral dağılımının oyuğun mutlak sıcaklığına bağlı olması beklenir. Sıcaklık artarken delik başlangıçta büyük ölçüde kızılötesi ışın yayar, daha sonra gittikçe parlaklaşan kor kırmızısına, sarıya, beyaza ve son olarak da mavi beyaza kayan ışıma görülür. Siyah cisim ışıması sıcaklığı mutlak sıcaklığın (0°K = -273°C) üzerinde olan cisimlerin yaptıkları ışımadır. Siyah cisim ışıması için şu iki durum geçerlidir: (1) sıcaklık arttıkça daha fazla akı yayını meydana gelir, (2) sıcaklığın artmasıyla akının spektral dağılımı daha kısa dalgaboylarına doğru kayar. Bu iki durum cisimlerin yayınım karakterlerinden bağımsız olarak geçerli olmaktadır. Bir cismin ışımasının büyüklüğü ve spektral dağılımı temel olarak cismin sıcaklığı ve yayıcılığının fonksiyonudur. Yayıcılığı bire eşit olan ideal cisim mükemmel siyah cisimdir. Bir siyah cismin ışıması Planck siyah cisim denklemiyle tanımlanmaktadır ve

$$L(\lambda,T)=\frac{c_1}{\lambda^5}\frac{1}{\left[\exp(\frac{c_2}{\lambda T})-1\right]} \tag{2.3}$$

olarak verilmektedir (Driggers vd. 1999). Denklemde $L(\lambda,T)$, cismin spektral yayınımıdır ve birimi W/cm²/μm'dir. T, cismin sıcaklığıdır ve birimi Kelvin'dir. λ, μm cinsinden dalgaboyudur. c_1 ve c_2 katsayılardır, $c_1=2\pi c^2h = 3.7418x10^4$ $W\mu m^4/cm^2$, $c_2=hc/k = 1.4388x10^4$ μmK olarak verilmektedir. $c= 3x10^8$ m/s ışığın boşluktaki hızı, $h=6,6256x10^{-34}$ $W\text{-}s^2$ Planck sabiti ve $k=1.38054x10^{-23}$ Ws/K Boltzmann sabitidir. Planck siyah cisim denklemi farklı sıcaklıklarda siyah cisimden yayılan ışımanın dalgaboyuna göre değişimini şekil 2.3 'de gösterildiği gibi spektral eğriler ile vermektedir.



Şekil 2.2 Değişik sıcaklıklarda bir siyah cisim yayıcısının spektrumundaki enerji dağılımı

Bir spektral banttaki toplam yayınım ise o dalgaboyu aralığında integral alınarak

$$L(T) = \int_{\lambda_2}^{\lambda_1} \frac{c_1}{\lambda^5} \frac{1}{\left[\exp(\frac{c_2}{\lambda T}) - 1\right]} d\lambda \qquad (2.4)$$

hesaplanmaktadır ve birimi W/cm²'dir.

2.4 Wien Yasası

Şekil 2.3 'de de görüldüğü gibi sıcaklığın artmasıyla yayınımın tepe noktaları kısa dalgaboylarına doğru kaymaktadır. Wien Yasası, Planck denkleminin dalgaboyuna göre türevinin sıfıra eşitlenmesiyle elde edilmektedir ve cismin sıcaklığa karşılık en yüksek yayınımın olacağı dalgaboyunu µm cinsinden

$$\lambda_{tepe} = 2897.8 / T \tag{2.5}$$

vermektedir.

2.5 Stefan – Boltzmann Yasası

Yayınım katsayısı tüm dalgaboyları için sabit olan ancak 1'den küçük olan cisimler gri cisimler olarak tanımlanmaktadır. Siyah ve gri cisimler için geçerli olan Stefan-Boltzmann Yasası tüm spektumdaki toplam yayınımın hesaplanmasına basit bir yaklaşım getirmektedir. Planck denkleminin tüm dalgaboyları üzerinden integralinin alınması ile elde edilen Stefan-Boltzmann Yasası

$$M(T) = \varepsilon \sigma T^4 \tag{2.6}$$

şeklinde verilmektedir. Yayınımı W/cm² cinsinden hesaplayan formüldeki σ, 5.67×10^{-12} W/cm²/K değerine sahip olan Stefan-Boltzmann sabiti olarak tanımlanmaktadır. ε, cismin yayınım katsayısıdır.

2.6 Lambert Yasası

Pürüzlü bir yüzeye sahip olan siyah cisim her yönde ışıma yapar. Her yönde ışıma yapan bu tür pürüzlü yüzeyler Lambert yüzey olarak tanımlanmaktadır. Parlak ve aynalı yüzeyler ise Lambert olmayan yüzeylerdir. Yüzey normali yönündeki ışıma şiddeti E_n iken normale göre θ açısıyla gelen ışıma şiddeti W/sr cinsinden Lambert Yasası'yla

$$E_\theta = E_n \cos\theta \tag{2.7}$$

hesaplanmaktadır (Hudson 1969).

2.7 Kirchhoff Yasası ve Enerjinin Korunumu

Kirchhoff Yasası'na göre bir gri cisimin ısıl denge şartları altında spektral yayınım katsayısı spektral emicilik katsayısına eşittir ve bu durum

$$\varepsilon(\lambda) = \alpha(\lambda) \tag{2.8}$$

şeklinde ifade edilebilir (Hudson 1969, Driggers vd. 1999).

Enerjinin Korunumu Yasası'na göre gelen güç, iletilen, yansıtılan ve emilen gücün toplamına eşittir. Bunun sonucu olarak ise bir cismin iletim (τ), yansıyıcılık (ρ) ve emilim (α) katsayılarının toplamı bire eşit olmaktadır ve bu durum

$$\tau + \rho + \alpha = 1 \tag{2.9}$$

şeklinde ifade edilmektedir. Siyah cisim için $\tau = \rho = 0$ ve $\alpha = \varepsilon = 1$ olmaktadır. İletim katsayısı sıfır olan opak cisimler için $\alpha = \varepsilon = 1 - \rho$ geçerlidir.

2.8 Atmosferin Optik Özellikleri

Yakın zamana kadar atmosferin fiziksel yapısı ile ısı transferine ve iklimlere etkisi incelenmiştir. Son zamanlarda ise atmosferin optik ışınıma etkisi büyük önem kazanmıştır. Bunda lazerin kullanım alanının genişlemesi ve optik uzaktan algılama sistemlerinin gelişmesi önemli rol oynamaktadır.

Bir nesneden yayılan optik ışınım, alıcıya gelmeden önce atmosferden geçer. Bu ışınımı ölçmek için bir sistem tasarlanmak istenildiğinde optik ışınımın ortamdan nasıl geçtiğinin ve hangi değişikliklere uğradığının bilinmesi gerekmektedir. Atmosferin optik ışınıma etkisi genellikle ışınım şiddetini zayıflatma ve doğrultusunu değiştirme şeklindedir. Bu zayıflatma, atmosferdeki gazlardan ve parçacıklardan, atmosferin çalkantısından ve kırpışmasından kaynaklanır. Geçen 30 yıl içinde atmosferin elektromanyetik ışınıma (UV, kızılötesi ve görünür ışık bölgesi dahil) etkisi üzerine

önemli çalışmalar yapılmıştır (Hill ve Lawrance 1986, Andreas 1988, Abreu ve Anderson 1996, Frederickson vd. 2000, Devir 2002, Tunick 2003, Bendersky vd. 2004, Sivaslıgil vd. 2008, 2009, 2013).

Elektromanyetik ışınımın atmosferdeki geçişinde dört temel atmosferik olayın etkisi vardır. Bunlar emilim, saçılma, yayınım ve türbülanstır.

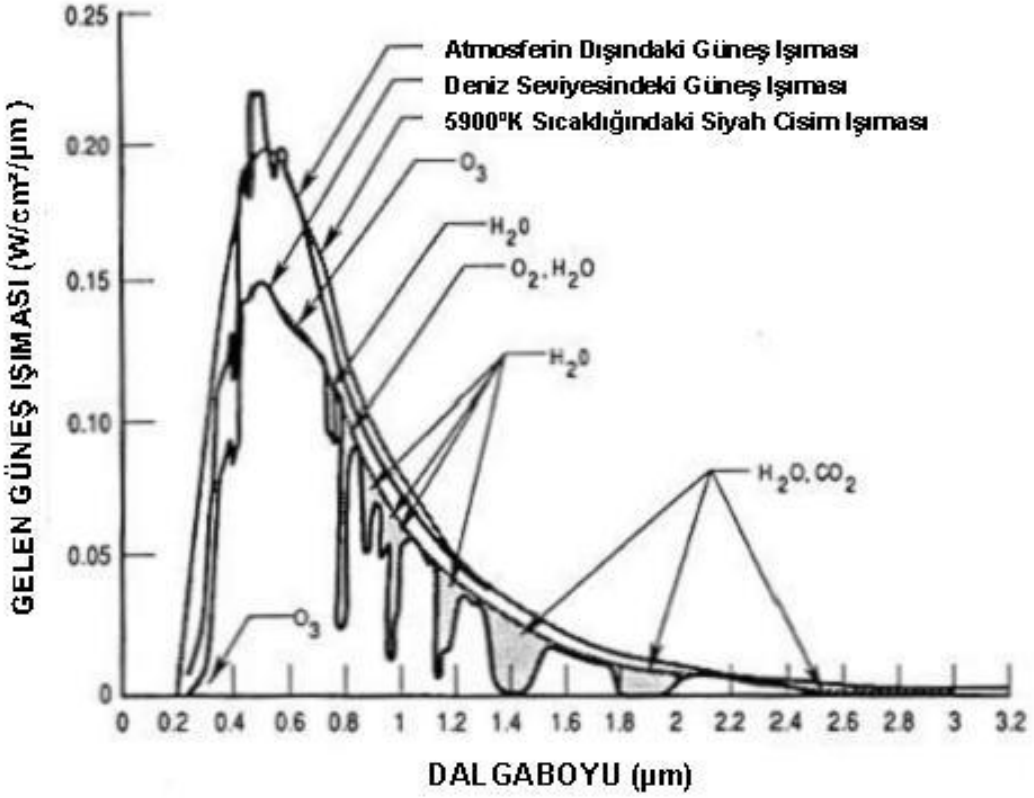
1. Emilim: Yayılım yolundaki atmosferik gazlar ışınımın bir kısmını emerler.
2. Saçılma: Atmosferik gazlar ve atmosferdeki parçacıklar ışınımın bir kısmının saçılmasına neden olurlar.
3. Yayınım: Atmosferik gazlar ve atmosferdeki parçacıklar belli bir bantta kendiliklerinden bir miktar ışınım yaparlar.
4. Türbülans: Atmosferin kırılma indisinin zamanla değişmesi ışınımı yolundan bir miktar saptırır.

2.9 Emilim

Emilim olayı temelde bir kuantum olayıdır. Foton, atmosferdeki bir moleküle çarptığında molekül tarafından emilir ve bunun sonucunda molekülün iç enerji seviyesi değişir. Foton moleküle çarptığında molekülden bir elektron koparmaya çalışır. Fakat moleküllerin elektronları atoma çok sıkı bağlı olduklarından, düşük enerjili fotonlar bunu başaramaz. Kısa dalga boylu fotonların (görünür ışık ve morötesi bu enerjiye sahip olabilirler) enerjileri büyük olduğundan molekülden bir elektron koparabilirler. Bununla birlikte bazı moleküller titreşim ve dönme enerji seviyelerine sahip olduklarından bu moleküller bir foton soğurduğunda serbest bir elektron oluşturma yerine bu rotasyonel ve vibrasyonel enerji seviyelerini değiştirir. Kızılötesi ışığın fotonunun enerjisi molekülden elektron koparmaya yetecek seviyede değildir ve foton molekül içinde soğurularak enerjisini yitirir. Bundan dolayı atmosferik emilim görünür ve bu durum ışık için bir sorun teşkil etmezken kızılötesi ışık için üzerinde durulması gereken bir problemdir.

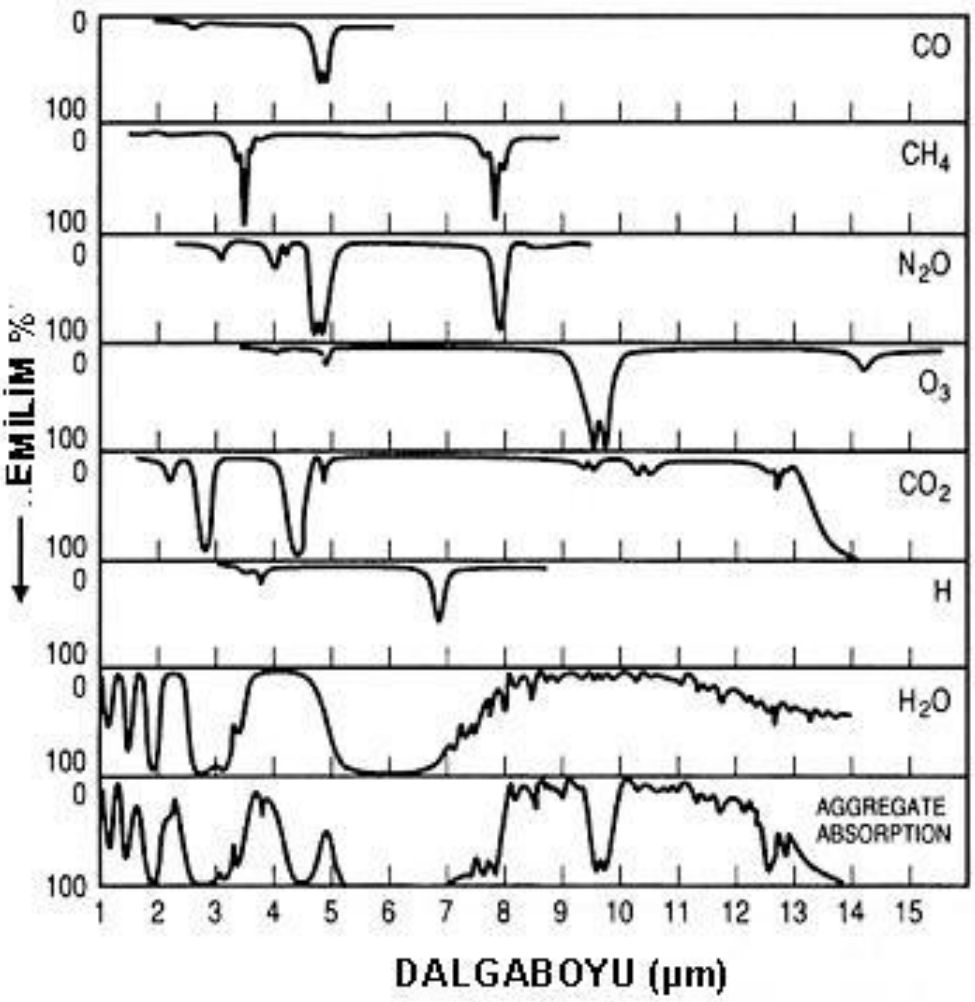
Atmosferde en çok bulunan gazlar nitrojen (N_2) ve oksijen (O_2)'dir. Bu gazlar eş çekirdekli, di-atomik moleküllerdir. Dolayısıyla elektrik dipol momentleri yoktur. Elektrik dipol momenti olmayan moleküller elektromanyetik ışınım emilimi yapmazlar. Bununla birlikte atmosferde bulunan CO_2 (karbondioksit) ve H_2O (su) kızılötesi ışığın emiliminde rol oynarlar.

Şekil 2.4'de atmosferden geçen güneş ışığının spektrumu görülmektedir.



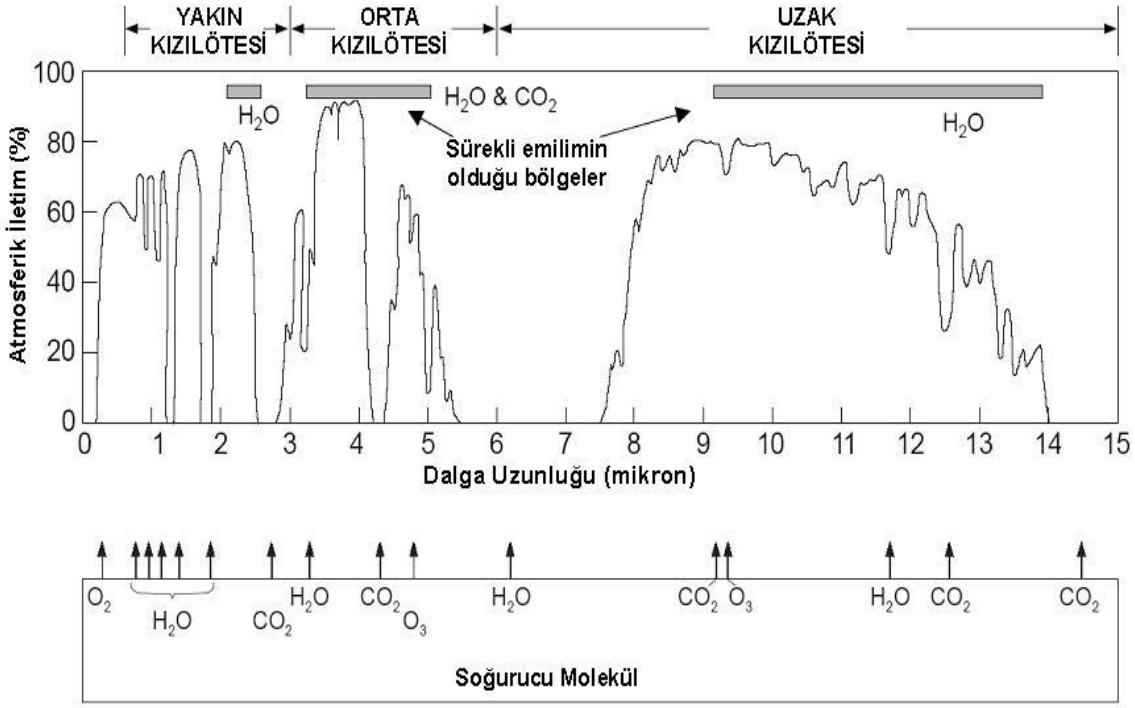
Şekil 2.3 Atmosferden geçen güneş ışığının spektrumu

Şekil 2.5'de atmosferde bulunan gazların hangi dalga boylarını soğurduğu gösterilmiştir. Her eğri, pencere olarak adlandırılan emilimin az olduğu, emilimin yüksek olduğu ve hemen hemen ışık geçirmeyen bölgelerden oluşur. Her gazın kendine has emilim eğrisi vardır. Şekil 2.5'de en alttaki eğride atmosferin toplam emilim eğrisi gösterilmiştir.



Şekil 2.4 Atmosferik gazların kızılötesi emilimi

Şekil 2.6'de deniz seviyesinde, 0,3 µm'den 14 µm'ye kadar olan bantta açık havada elektromanyetik ışınımın atmosferden geçişine ilişkin deneysel sonuçlar gösterilmektedir. Bu eğri geçişin başarı ile yapıldığı bölgelerden (atmosferik pencere) ve geçişin zayıf olduğu bantlardan (emilim bandı) oluşur.

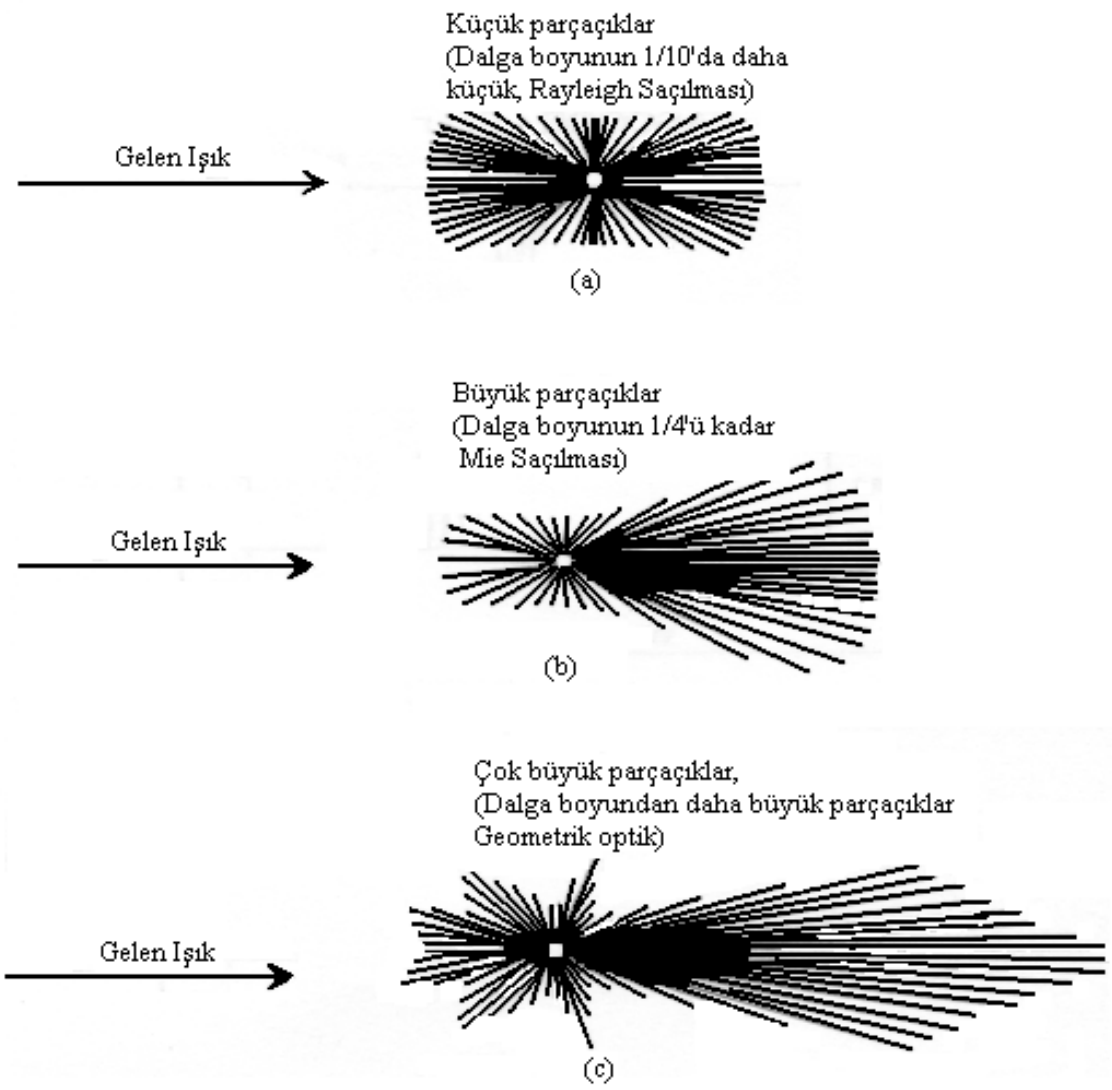


Şekil 2.5 Açık havada elektromanyetik ışınımın atmosferden geçişi

2.10 Saçılma

Saçılma olayı, fotonların atmosferdeki parçacıklar ile çarpışmasından kaynaklanır. Bu çarpışma sonucunda fotonun enerjisi her yöne dağılır. Dağılmanın miktarı ve şekli atmosferdeki parçacığın büyüklüğüne, parçacığın yoğunluğuna ve kırılma indisine ve fotonun dalgaboyuna ve kutuplanmasına bağlıdır. Saçılma olayı emilim olayından farklıdır. Emilim olayında, fotonun ışınım enerjisi ortamda dönüşüme uğrarken saçılmada ise fotonun ışınım enerjisi yine ışınım enerjisi olarak kalır. Fakat ışınım enerjisinin yönü ve çapı değişir.

Genel olarak saçılma modelleri, üç gruba ayrılabilir (Driggers vd. 1999). Bu kategoriler, ışın dalgaboyu ile atmosferik parçacığın boyutları arasındaki ilişkiye bağlıdır. Bu durum şekil 2.7'de gösterilmektedir.



Şekil 2.6 Atmosferik parçacıkların oluşturduğu: a. Rayleigh, b. Mie, c. Geometrik saçılmalar

Bu üç kategoriden ilki Rayleigh saçılmasıdır. Eğer atmosferik parçacığın yarıçapı ışığın dalga boyunun 1/10'undan küçükse meydana gelen saçılma Rayleigh saçılmasıdır. Bu durumda meydana gelen saçılma λ^{-4} ile orantılıdır (Driggers vd. 1999). Şekil 2.7a'da görüldüğü gibi saçılma simetriktir. Gökyüzünün mavi görülmesinin nedeni Rayleigh saçılmasıdır.

İkinci tip saçılma, Mie saçılması veya aerosol saçılmasıdır. Eğer atmosferik parçacığın yarıçapı ışığın dalga boyuna yakın ise Mie saçılması meydana gelir. Şekil 2.7b'de gösterildiği gibi saçılma ön tarafa doğru daha yoğun olacak şekilde gerçekleşmektedir.

Mie teorisi, klasik elektromanyetik denklemlere dayanır ve sınır koşulları kullanılarak çözülür.

Üçüncü tip saçılma ise atmosferik parçacığın yarıçapı ışığın dalga boyundan büyük olduğunda meydana gelir. Bu saçılmada, saçılmanın büyük bir kısmı yayılma doğrultusunda olur. Bu saçılma geometrik optik ile ifade edilebilir. Şekil 2.7c'de gösterildiği gibi saçılma büyük ölçüde ön tarafa doğru gerçekleşmektedir. Sis, bu tip bir saçılma meydana getirir. Çünkü sis, μm boyutunda parçacıklardan (toz, tuz ve etrafı su damlacıkları ile sarılmış parçacıklardan) meydana gelir. Kızılötesi ışınların dalga boyu görünür ışığın ve morötesi ışığın dalga boyuna göre daha büyük olduğundan büyük parçacıklar kızılötesi ışınları daha fazla dağıtırlar.

2.11 Yol ışıması

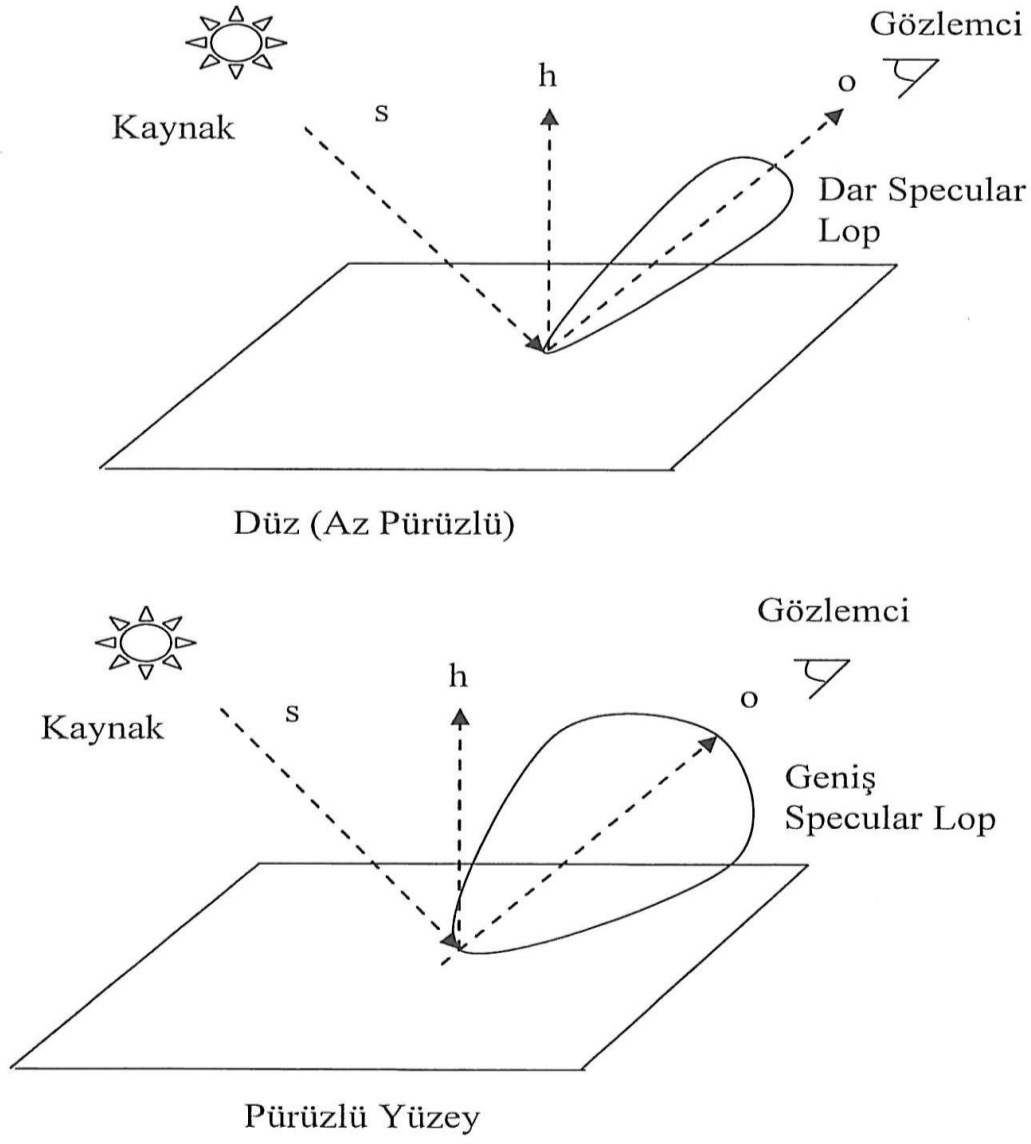
Yol ışıması, algılayıcı sistemin görüş alanı içerisinde yer alan atmosferik gazların, mutlak sıfırın üstünde bir sıcaklığa sahip olduklarından, doğal olarak yaptıkları yayınım olarak ifade edilmektedir. Kızılötesi görüntüleme sistemleri, hedef ile arka plandaki cisimlerin yaydığı termal ışınımlar arasındaki farkı algılar. Bu tip sistemler için yolda meydana gelen yayınım önemli olmayacaktır. Çünkü hem hedef için hem de arkaplan için aynı yol söz konusudur ve bunların farkı alındığından etkisi olmamaktadır. Bununla birlikte, hedef ve arkaplan için aynı yol söz konusu olmadığında yolda oluşacak yayınım sistemde etkili olacaktır. Bu durumda yayınım, atmosferik bir etki olarak ele alınmalıdır. Algılayıcı sistem ile hedef kaynak arasındaki yol ışımasının hesaplamalara dahil edilmesi algılayıcı sistemin genel olarak performans hesaplamalarında, modelleme ve simülasyon hesaplamalarında sistem üzerine düşen ışıma miktarını tanımlayabilme açısından son derece önemlidir. Yol ışıması özellikle çok düşük yol uzunlukları ve yüksek atmosferik geçirgenlik durumları için hesaplamalarda ihmal edilebilmektedir fakat yol uzunluğu arttıkça ve atmosferik geçirgenlik azaldıkça sistem üzerinde etkileri belirleyici hale gelmektedir.

2.12 Türbülans

Atmosferik türbülans düzensiz hava hareketidir. Öyle ki, herhangi bir anda hava moleküllerinin hızı ve doğrultusu rasgele bir değerdedir. Atmosferik türbülans, gece, yıldızların ışıklarının kırpışmasına, sıcak günlerde uzak mesafelerdeki nesnelerin titreşmesine neden olur. Bundan dolayı, atmosferik türbülans, görüntüleme sistemlerinin performansını ve lazer ışığının yayılmasını etkiler.

2.13 BRDF Modeli

Çift yönlü yansıtma dağılımı fonksiyonu (Bidirectional Reflectance Distribution Function:BRDF), yansıyan ışımanın (dL_r) gelen ışımaya (dE_i) oranı olarak tanımlanmıştır. Spektral yansıtma özelliklerinin değişimleri çok geniş bantta meydana gelmektedir.



Şekil 2.7 Yüzey pürüzünün yansımaya etkisi

Birçok araştırmacı tarafından da belirtildiği gibi tek bir noktadan gelen ışığın yüzeye çarptıktan sonra yansıması yaklaşık olarak Snell Yasası'na uymaktadır. Bu yansımalar en yüksek değeri Snell Yasası tarafından belirlenen açıda olmak üzere belirli bir zarfın içinde olmaktadır. Cisim yüzeylerinin ne kadar düzgün olduğuna bağlı olarak bu zarfın genişliği değişmektedir. Şekil 2.8'de yüzeyin pürüz durumuna bağlı olarak yansıma etkisinin değişimine örnek olarak gösterilmektedir.

En fazla ışımanın olduğu ana zarfa *e* denilecek olur ise, BRDF modeli

$$f(\theta_i,\phi_i;\theta_r,\phi_r;\lambda)=\frac{1}{\pi}\rho_d(\lambda)+\rho_s(\lambda)g(\hat{N}_1,\hat{N}_2,\hat{O}) \tag{2.10}$$

şeklinde verilir. Bu ifadede g fonksiyonu en büyük değeri olan 1/[πsin2(e/2)] değerine O açısı e/2 içerisinde olduğunda ulaşmakta diğer açılarda sıfır olmaktadır.

Bunlara ek olarak nesnenin yapıldığı maddenin yayınım sabiti de modellemeye dahil edilmelidir. Eğer maddenin geçirgenlik katsayısı sıfır olarak alınırsa, enerjinin korunumu ilkesine göre gelen tüm ışığın yansıtılması veya soğurulması gereklidir. Yansıyan toplam ışık BRDF'nin tüm yansıma olan katı alçılar üzerinden integrali alınarak bulunabilir. Geliş yönünden soğurulan tüm ışığın Kirchhoff Yasası'na göre o yöndeki yayınıma eşit olması gereklidir. Bu nedenle,

$$\iint f(\theta_i,\phi_i;\theta_r,\phi_r;\lambda)\cos(\theta_r)\sin(\theta_r)d\theta_r d\phi_r+\varepsilon(\theta_i,\phi_i;\lambda)=1 \tag{2.11}$$

denklemi yazılabilir. Bu denklemde daha önce elde ettiğimiz BRDF fonksiyonunu koyacak olursak,

$$\rho_d(\lambda)+\rho_s(\lambda)+\varepsilon(\theta_i,\phi_i;\lambda)=1 \tag{2.12}$$

bağıntısını elde ederiz. Bu nedenledir ki elde ettiğimiz BRDF modeli, yayınım katsayısının açıdan bağımsız olması zorunluluğunu getirmektedir. Buradan hareketle denklem şu şekilde elde edilmektedir:

$$\varepsilon(\lambda)=1-\rho_d(\lambda)-\rho_s(\lambda) \tag{2.13}$$

2.14 Işımanın Hesaplanması

Kızılötesi bantta yapılan en önemli hesaplamalardan biri de ışıma hesaplamasıdır. Bu hesaplama kullanılarak hedeften gelen ışımanın değeri hedefe ait fiziksel parametreler de kullanılarak bulunabilmektedir.

Hedef üzerinde görülebilen her bir **x** noktasından gelen spektral ışıma $L_\lambda(\mathbf{x})$ hesaplandıktan sonra hedefin görülebilen alanı üzerinden integrali alınabilir. Hedef

üzerindeki her bir birim alanın yüzey normali ile kullanıcının baktığı doğrultunun skiler çarpımları, hedef yüzeyin kullanıcı tarafından görülebilen miktarını belirleyecektir.

Eğer kaynağın dalgaboyuna bağlı ışıma yoğunluğu

$$I_{kaynak} = \int_{cisim} L(x,\lambda)dA \tag{2.14}$$

$$A_{cisim} = \int_{cisim} dA \tag{2.15}$$

ise kaynaktan çıkan ışımanın kullanıcı veya gözlemcide görülen miktarını bulmak için

$$I_{gör}(\lambda) = I_{kaynak}(\lambda)\tau_{önplan} + L_{önplan}(\lambda)A_{cisim} \tag{2.16}$$

bağıntısı kullanılabilir. Bu bağıntılara göre, arkaplan düzgün dağılmış olarak kabul edildiğinde

$$I_{zıtlı}(\lambda) = I_{gör}(\lambda) - L_{arkaplan}(\lambda)A_{cisim} \tag{2.17}$$

olarak hesaplanan ışıma kullanıcı tarafından kullanılan sezimcisinin etkin olduğu dalgaboyu bandında integralinin alınması gerekmektedir.

$$I_{zıtlı}(\Delta\lambda) = \int_{\Delta\lambda} I_{zıtlı}(\lambda)r_{sezimci}(\lambda)d\lambda \tag{2.18}$$

Herhangi bir noktaya ait ışıma termal yayınım, cisim tarafından yansıtılan güneş ışıması, yeryüzünden veya bulutlarda yansıyan ışıma ve gökyüzünden yansıyan ışıma, yayılan ve iletilen enerjinin toplamıdır.

3. KIZILÖTESİ ATMOSFERİK ANALİZ YAZILIMI (KAAN)

Bu bölümde **K**ızılötesi **A**tmosferik **AN**aliz (**KAAN**) Yazılımı ile ilgili teknik bilgiler, kullanılan modellerin çalışma prensibi, yazılımın kullanımı ve literatürde yer alan açık saha ölçümlerinin sonuçları kullanılarak yapılan doğrulama çalışmaları ve bu çalışmalar üzerinden MODTRAN yazılımı çıktıları ile karşılaştırma çalışmaları yer almaktadır.

MODTRAN (MODerate Resolution TRANsmission) U.S. Hava Kuvvetleri Araştırma Laboratuvarları'nda 25 yılı aşkın zamanda geliştirilen bir atmosfer modelleme yazılımıdır. Yazılımda yer alan atmosfer modelinde tanımlanan bir yol için geçirgenlik ve ışıma hesaplamaları yapılmaktadır. Yazılım FORTRAN 77 kodu olarak yazılmıştır. MODTRAN geçirgenlik hesaplamalarında HITRAN veri bankasında yer alan moleküler zayıflama katsayılarını hesaplamakta kullanılan deneysel değerler kullanılmaktadır. Yazılımda çok katmanlı düzlemleri eşdeğer tek homojen bir düzlem olarak ifade etmek için Curtis-Godson yaklaşımı kullanılmaktadır. MODTRAN 0 – 50000 cm^{-1} frekans aralığında ve azami 2 cm^{-1} spektral çözünürlükte hesaplamalar yapabilmektedir. Atmosfer 0 – 100 km yükseklik aralığında 33 katman olacak şekilde modellenmektedir. MODTRAN yazılımında standart atmosfer modellerinin dışında kullanıcı tarafından katmanların tanımlanabileceği bir atmosfer modeli de seçilebilmektedir. Toz, bulut ya da diğer parçacıklardan kaynaklanan etkilerin hesaplanabilmesi için MODTRAN yazılımında yer alan aerosol modeli seçeneği kullanılmaktadır.

KAAN yazılımı, kızılötesi bantta atmosferik arkaplanın modellenebilmesi için gereken verilerin hesaplanabildiği ve kızılötesi atmosferik arkaplan analizinin yapılabildiği bir yazılımdır (Sivaslıgil vd. 2008). MATLAB ortamında geliştirilen bu yazılımda, öncelikli amaç, asgari ve kabul edilebilir hata oranlarında; gerçek zamanlı simülasyon ve uygulamalarda kullanılabilecek kızılötesi atmosferik analizlerin yapılarak gerekli verilerin hesaplanmasıdır. Bu kapsamda yazılımın hızlı çalışabilmesi dalgaboyu çözünürlüğü düşük olarak alınmıştır. KAAN yazılımı 5 ana hesaplama modülünden oluşmaktadır. Bu modüller, girdi parametreleri ve yapılması istenen hesaplamalara göre ana yazılım tarafından çalıştırılarak hesaplamalar yapılmakta ve çıktıları verilmektedir. KAAN yazılımda geçirgenlik hesaplamalarında katmanlar oluşturulurken kullanılan

bazı ağırlık fonksiyonları kullanılmaktadır. Bu fonksiyonlarla ve KAAN yazılımının algoritması ile ilgili detay bilgiler tez kapsamında yer almamaktadır. Bu konularla ilgili bilgi için tez sahibi ile iletişime geçilmesi gerekmektedir.

KAAN yazılımı 2007 yılında ilk sürüm çalışmalarına başlanmış ve güncellemeleri çalışmaları günümüze kadar uzanan bir çalışmadır. KAAN yazılımı algoritması teknik hesaplamalar açısından yüksek performans ve kolay kullanım ortamı olarak tanımlanan The MathWorks, Inc. firmasının sahibi olduğu ve geliştirmelerini yaptığı MATLAB ortamında kodlanmıştır.

KAAN yazılımında kullanılan modelleme yaklaşımları ile ilgili bilgiler Bölüm 3.1'de, yazılımda kullanılan girdi parametreleri ve yazılım ile ilgili genel akış diyagramı Bölüm 3.2'de anlatılmaktadır.

3.1 Teknik Bilgiler

Bu bölümde KAAN yazılımındaki modellerde kullanılan fiziksel yaklaşımlar ve hesaplamalar yer almaktadır. Yazılımda kullanılan modeller yedi ana başlık altında toplanarak anlatılmaktadır. Bunlar sırası ile, atmosferik geçirgenlik, yol ışıması, güneşten gelen ışıma, yüzey ışıması, yüzeyden yansıyan güneş ışıması, aydan gelen ışıma ve yüzeyden yansıyan ay ışıması olarak yer almaktadır. KAAN yazılımında kullanıcı tarafından oluşturulan atmosfer modeli için LWIR bandında ve 20 km menzil için P4 işlemcili, 1GB RAM ve 32 bit Windows XP işletim sistemine sahip standart bir bilgisayar ortamında çalışma frekansları, analiz tipine göre hesaplandığında, azami olarak yaklaşık değerler çizelge 3.1'de gösterilmektedir. Bu çalışma frekansları dalgaboyu bandının MWIR ya da SWIR olarak değiştirilmesi (aralığın azaltılması), menzilin azaltılması, aerosol girdilerinin değiştirilmesi ve yol tepe açısının arttırılması gibi durumlarda artış göstermektedir.

Çizelge 3.1 KAAN çalışma frekansları

ANALİZ TİPİ (BİLEŞENLER)	ÇALIŞMA FREKANSI (Hz) (Windows Uygulaması)	ÇALIŞMA FREKANSI (Hz) (MATLAB7)
Atmosferik Geçirgenlik	10.2	21.8
Yol Işıması	10	21.7
Güneşten Gelen Işıma	11.5	23.2
Aydan Gelen Işıma	10.6	22.7
Hepsi (Bütün Bileşenler)	6.25	11.2

3.1.1 Atmosferik geçirgenlik

Kaynaklardan gelen ışımaların atmosfer ortamından geçişlerinde ne kadarının atmosferden geçebildiği ve gözlemciye ulaştığını belirleyen etken atmosferik geçirgenlik olarak belirtilebilir. Atmosferde bulunan gazlar ve parçacıklar bu geçirgenliği etkileyen önemli parametrelerdir. Bu modelde Passman ve Larmore tarafından sunulan atmosferik geçirgenlik yaklaşımları temel alınmıştır (Hudson 1969). KAAN yazılımda atmosferik geçirgenlik değerleri

$$\tau = \tau_{H_2O} \times \tau_{CO_2} \times \tau_d \tag{3.1}$$

eşitliği kullanılarak hesaplanmaktadır. Bu eşitlikte τ_{H2O}, τ_{CO2} ve τ_d sırası ile atmosferik geçirgenliği etkileyen ana etkenler olarak H_2O, CO_2 ve aerosoller şeklinde yer almaktadır. τ_{H2O} ve τ_{CO2} değerleri için ölçülmüş verilerden ya da hesaplamalardan çıkartılan verilerden oluşturulan tablolar kullanılmaktadır. EK-1'de CO_2 ve H_2O için tablolar yer almaktadır. H_2O için oluşturulan geçirgenlik tablosundaki su buharı içeriği mutlak nem ve yol uzunluğu ile hesaplanmaktadır. Mutlak nem ise bağıl nem ve

sıcaklık değerlerine bağlı olarak oluşturulmuş bir tablo kullanılarak hesaplanmaktadır. Su buharı içeriği hesaplaması

$$Su\ Buhar\ İçeriği = Mutlak\ Nem \times C \times Yol\ Uzunlugu \tag{3.2}$$

eşitliği kullanılarak yapılmaktadır. Eşitlikte C bir sabittir ve değeri yaklaşık olarak 1 m^3.mm/g.km alınmaktadır. Mutlak nem hesaplaması için kullanılan değerler çizelge 3.2 'de gösterilmektedir (Hudson 1969). Bu çizelge -25 ^oC ile +35 ^oC arasında mutlak nem hesaplaması için kullanılan değerleri içermektedir.

CO_2 ve H_2O için oluşturulan geçirgenlik tabloları deniz seviyesinde, yüksekliğin "0" metre olduğu durum için oluşturulup

$$x_0 = x \times \left(\frac{P}{P_0} \right)^k \tag{3.3}$$

eşitliği kullanılarak elde edilen değerler bu tabloların yüksekliğe göre yenilenmesini sağlamaktadır. Böylece istenilen yükseklikteki geçirgenlik hesaplamaları yapılabilmektedir. Bu eşitlikte x_o deniz seviyesinde yol uzunluğu, x istenilen yükseklikteki yol uzunluğu, P istenilen yükseklikteki basınç, P_0 deniz seviyesindeki basınç ve k ise deneysel olarak elde edilen bir sabittir. Yazılımda "Yükseklik Korelasyon Tablosu" olarak girilen bir tablodan alınan bu değerler, farklı bölgeler için tekrar kullanıcı tarafından yazılım içerisine entegre bir modül yardımı ile oluşturularak kullanılabilmektedir.

Çizelge 3.2 Doymuş havadaki su buharı kütlesi, g/m^3

Sıcaklık (^{o}C)	**0**	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**
-20	0.89	0.81	0.74	0.67	0.61	0.56	-	-	-	-
-10	2.15	1.98	1.81	1.66	1.52	1.4	1.28	1.18	1.08	0.98
-0	4.84	4.47	4.13	3.81	3.52	3.24	2.99	2.75	2.54	2.34
0	4.84	5.18	5.54	5.92	6.33	6.76	7.22	7.7	8.22	8.76
10	9.33	9.94	10.57	11.25	11.96	12.71	13.5	14.34	15.22	16.14
20	17.22	18.14	19.22	20.36	21.55	22.8	24.11	25.49	27	28.45
30	30.04	31.7	33.45	35.28	37.19	39.19	-	-	-	-

Aerosollerin geçirgenliğe etkileri

$$\tau_d = e^{-\gamma.z} \tag{3.4}$$

eşitliği kullanılarak hesaplanmaktadır. Bu eşitlikte γ zayıflama katsayısı (çizgisel) ve z yol uzunluğudur. KAAN yazılımında aerosol içeriği dört durum için hesaplanmaktadır. Bunlar sis, yağmur, toz bulutu ve kar durumlarıdır. Bu dört durum için zayıflama katsayısı hesaplanarak geçirgenlik değerleri bulunmaktadır. Sis durumu için zayıflama katsayısı çizelge 3.3'de yer almaktadır (Caniou 1999). Yağmur durumu için zayıflama katsayısı

$$\gamma = A \times R^B \tag{3.5}$$

eşitliği kullanılarak hesaplanmaktadır. Bu eşitlikte A ve B sabit değerler, R ise yağmur oranı olarak kullanılmaktadır. Bu eşitlik Marshall ve Palmer dağılımları kullanılarak çıkartılabilmektedir. A ve B katsayılarına ait değerler çizelge 3.14 'da yer almaktadır (Caniou 1999). Toz bulutu durumu için zayıflama katsayısı

$$\gamma = \sigma \times u \tag{3.6}$$

eşitliği ile hesaplanmaktadır. Eşitlikte σ saçılma katsayısı ve u toz bulutu yoğunluğu olarak yer almaktadır. Saçılma katsayısı ve toz bulutu yoğunluğu için kullanılan değerler sırasıyla çizelge 3.5 ve çizelge 3.16 'de yer almaktadır (Caniou 1999). Kar durumundaki zayıflama katsayısı ise

$$\gamma = \frac{3{,}912}{V} - 0{,}01159 \tag{3.7}$$

eşitliği kullanılarak hesaplanmaktadır (Hudson 1969). V görüş mesafesi (meteorolojik optiksel mesafe olarak) olarak eşitlikte kullanılmaktadır. Jenerik olarak aerosollerden kaynaklanan saçılmaların etkili olduğu durumdaki zayıflama katsayısı

$$\gamma = \left(\frac{3{,}912}{V} \left(\frac{\lambda_0}{\lambda} \right)^q \right)^m \tag{3.8}$$

eşitliği kullanılarak hesaplanmaktadır. Burada V görüş mesafesi, λ dalgaboyu, λ_0 referans dalgaboyu, q ve m deneysel sabitler olarak kullanılmaktadır. λ_0 referans dalgaboyu genellikle 0.55 μm ya da 0.61 μm olarak alınmaktadır. Bunun sebebi bu alanlarda atmosferik emilimin çok küçük ve geçirgenliği etkileyen tek faktörün saçılma olması şeklinde değerlendirilmektedir. Deneysel değerlerden q değeri, görüş mesafesinin yüksek olduğu (80 km'den büyük) durumlar için 1.6; ortalama olduğu (6 km ile 80 km arasında) durumlar için 1.3; düşük olduğu (6 km'den küçük) durumlar için ise $0.585V^{1/3}$ olarak alınmaktadır. Eşitlikte kullanılan diğer bir deneysel değer olan m parametresi ise literatürde genellikle 1 olarak alınmaktadır, öte yandan bu tez çalışması kapsamında kullanılan saha ölçümleri ile elde edilen değerlere göre yapılan yaklaşımlardan 0.75 olarak elde edilmiştir.

KAAN yazılımında dalgaboyu aralığı kullanıcı tarafından girilebildiği için bant ortalaması olarak verilen değerler kullanıcı tarafından girilen banda en yakın olacak şekilde hesaplamalara katılmaktadır.

Çizelge 3.3 Sis durumu için zayıflama katsayısı değerleri

Aerosol Tipi	**Görüş Mesafesi (km)**	**MWIR Bandı Zayıflama Katsayısı**	**LWIR Bandı Zayıflama Katsayısı**
Pus	2	0.29	0.18
	5	0.11	0.07
	10	0.06	0.04
	15	0.04	0.02
Yoğun Sis	0.5	10.1	2.4
	1	5.1	1.2
Yaygın (Adveksiyon) Sis	0.5	8.4	9
	1	4.2	4.5

Çizelge 3.4 Yağmur durumu zayıflama katsayısı eşitliği sabitleri

Yağmur Tipi	**A**	**B**
Çiseleme	0.509	0.63
Geniş-Dağınık	0.319	0.63
Şimşek-Fırtına	0.163	0.63

Çizelge 3.5 Toz bulutu durumu için saçılma katsayısı değerleri

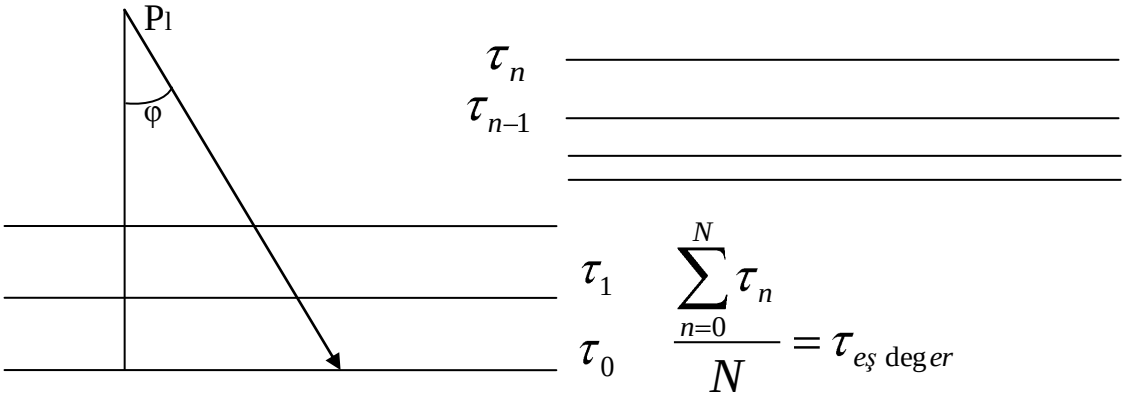
Dalgaboyu Bandı (μm)	**Saçılma Katsayısı ($m^2.g^{-1}$)**
3 – 5	0.27
8 – 12	0.25

Çizelge 3.6 Toz bulutu durumu için yoğunluk değerleri

Görüş Mesafesi (km)	**Yoğunluk ($g.m^{-3}$)**
0.2	0.11
0.47	0.069
1	0.021
3.2	0.052
8	0.002

KAAN yazılımında aynı zamanda eğik yol için hesaplamalar da yapılabilmektedir. Bu hesaplamalarda temel olarak Curtis-Godson yaklaşımından yararlanılmaktadır

(Biberman 2000) ve yüksekliğe bağlı olarak değişen durumlar etkin yükseklik seviyeleri göz önünde bulundurularak hesaplamalar yapılmaktadır (Sivaslıgil vd. 2009). Bu yaklaşımda amaç çoklu katmanlar yerine denk tek bir katman hesaplanarak işlem yapılır. Şekil 3.1'de bu hesaplama genel olarak gösterilmektedir. φ tepe (zenith) açısı, τ geçirgenlik katsayısı, n katman indisi ve N'de toplam katman sayısı olarak yer almaktadır. Sonraki bölümlerde anlatılacak olan yol ışıması, güneşten gelen ışıma, yüzey ışıması, yüzeyden yansıyan güneş ışıması, aydan gelen ışıma ve yüzeyden yansıyan ay ışıması modellerinde bu bölümde anlatılan atmosferik geçirgenlik hesaplamaları kullanılmaktadır.



Şekil 3.1 Eğik yol hesaplamaları

3.1.2 Yol ışıması

KAAN yazılımında yol ışıması modelinde geçirgenlik ve yol sıcaklığı iki ana etken olarak kullanılmaktadır. Yol ışıması hesaplanırken Planck Yasası'ndan yararlanılmaktadır. Genel hesaplama algoritması

$$PR = L(\lambda, T_{Yol})$$
$$TSPR = PR \times (-\tau) \; W/m^2 \mu m sr \tag{3.9}$$

şeklindedir. L, ışıma miktarının hesaplanmasında kullanılan Planck Yasası'nı ifade eden fonksiyondur.

3.1.3 Güneşten gelen ışıma

Güneşten gelen ışıma modelinde güneş ışıması ve atmosfer geçirgenliği ana etkenler olarak yer almaktadır. Bu hesaplamalarda tepe açısına bağlı olarak azami yükseklik 100 km olacak bir yol için atmosferik geçirgenlik hesaplanarak güneşten gelen ışıma modelinde kullanılmaktadır. Genel hesaplama algoritması

$$GI = L(\lambda, T_{güneş})$$
$$GSGI = GI \times \tau \times StrSTE \times C \quad W/m^2 \mu m \tag{3.10}$$

şeklindedir. StrSTE güneşden dünyaya olan katı açı değeridir. StrSTE ve C katsayılarının değerleri sırasıyla $5{,}6678*10^{-9}$ sr ve $1{,}1979*10^{4}$'dır. Güneş sıcaklığı ($T_{güneş}$) 5777 °K olarak alınmaktadır.

3.1.4 Yüzey ışıması

Yüzey ışıması modelinde seçilen yüzey tipine göre yüzeyden gelen ışıma hesaplanmaktadır. Bu hesaplamalarda kullanıcı tarafından açı bağımlılığı eklenebilmektedir. Açı bağımlılığı durumu bir çeşit iki yönlü yansıma dağılımı foksiyonu, BRDF (bidirectional reflection distribution function), algoritması gibi de düşünülebilmektedir. KAAN yazılımında dört yüzey tipi bulunmaktadır. Bunlar deniz, orman, kar ve çöl olarak yer almaktadır. Genel hesaplama algoritması

$$SR = L(\lambda, T_{yüzey})$$
$$I_{TSSR} = SR \times \tau \times EF \times \varepsilon_{yüzey} \; W/m^2 \mu m \, sr \tag{3.11}$$

şeklindedir. Burada $\varepsilon_{yüzey}$ dalgaboyuna bağlı yüzey yayınım katsayısıdır. "EF" ise yol tepe açısına göre yol doğrultusunda yüzeyin yaptığı yayınım miktarını belirleyen katsayı olarak kullanılmaktadır. KAAN algoritmasında Kirchhoff Yasası ve tanımlanan yüzeyin opak (saydam olmayan) olduğu varsayımı ile

$$\varepsilon = 1 - R \tag{3.12}$$

eşitliği kullanılmaktadır ve yüzey ışıması hesaplamalarında önemli bir etken olarak yer almaktadır. R yüzey yansıma katsayısı olarak kullanılmaktadır.

3.1.5 Yüzeyden yansıyan güneş ışıması

Bu modelde güneşten gelen ışıma modeli ile hesaplanan güneş ışımasının yüzeyden yansıması hesaplanmaktadır. Yüzey ışıması modelinde olduğu gibi bu hesaplamalar da yüzey tipine göre yapılmaktadır. Işıma miktarı için genel hesaplama algoritması

$$I_{TSSRSR} = \{GSGI/\pi \times \tau \times GF \times R_{yüzey}\} \quad W/m^2 \mu m sr \tag{3.13}$$

şeklindedir. "GF" yol tepe açısı, güneş tepe açısı ve yol ile güneş arasındaki yanca açısına göre yol doğrultusunda yüzeyin yaptığı yayınım miktarını belirleyen katsayıdır. $R_{yüzey}$ ise yüzey yansıma katsayısı olarak bir önceki bölümde anlatıldığı şekilde kullanılmaktadır.

3.1.6 Aydan gelen ışıma

Aydan gelen ışıma modelinde ay ışıması ve atmosfer geçirgenliği ana etkenler olarak modelde yer almaktadır. Bu hesaplamalarda tepe açısına bağlı olarak azami yükseklik 100 km olacak bir yol için atmosferik geçirgenlik hesaplanarak aydan gelen ışıma modelinde kullanılmaktadır. Genel hesaplama algoritması

$$\begin{aligned} MR &= L(\lambda, T_{Ay}) \\ TSMR &= MR \times \tau \times StrMTE \times \varepsilon_{ay} \times M \;\; W/m^2 \mu m \end{aligned} \tag{3.14}$$

şeklindedir. ε_{ay} ay yüzeyinin yayınım katsayısıdır (Shaw 1999). Bu model, dolunay durumu için geçerlidir ve ayın sıcaklığı (T_{ay}) 390°K olarak alınmaktadır (Shaw 1999). StrMTE aydan dünyaya olan katı açı değeridir. StrMTE ve M katsayılarının değerleri sırasıyla 0,2994 sr ve $8{,}5732*10^{-4}$ olarak yer almaktadırlar.

3.1.7 Yüzeyden yansıyan ay ışıması

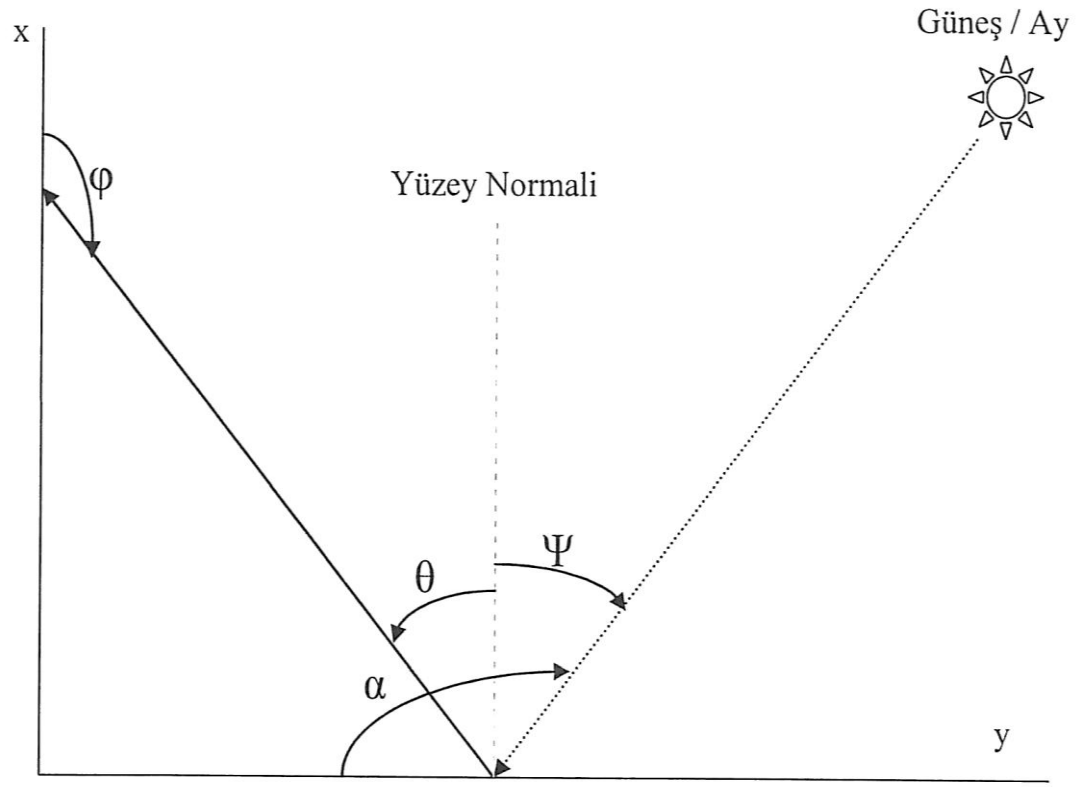
Yüzeyden yansıyan ay ışıması modeli yüzeyden yansıyan güneş ışıması modeli ile aynı kabulleri içermektedir. Farklı olarak güneş ışıması yerine aydan gelen ışıma ve aydan yansıyan güneş ışıması kullanılmaktadır. Genel hesaplama algoritması

$$\begin{aligned} MRR &= \{GI \times StrSTE \times C \times R_{ay} \times \left(\frac{1}{4 \times \pi}\right) \times \tau \times StrMTE \times M \times MCF\} \\ TTSMR &= MRR + TSMR \\ I_{TSSRMR} &= \{TTSMR / \pi \times \tau \times GF \times R_{yüzey}\} \quad W/m^2 \mu m\, sr \end{aligned} \tag{3.15}$$

şeklindedir. Bu eşitlikte MCF güneşin aydan yansımasının hesaplanmasında kullanılan bir katsayıdır ve değeri 1,2 olarak kullanılmaktadır. R_{ay} ise ay yüzeyinin yansıma katsayısıdır.

3.2 Yazılım Girdileri ve Çalışma Prensibi

KAAN yazılımında kullanılan geometri ve açı yönleri şekil 3.2'de gösterilmektedir. Bu açılar; φ yol tepe açısı, Ψ güneş/ay tepe açısı, α yol ile güneş/ay arasındaki yanca açısı ve θ yüzeyin normali ile yol arasındaki yükselti açısı olarak tanımlanarak yazılımın modellerinde kullanılmaktadır. KAAN yazılımının girdileri, girdilerin tanımları ve sınırları çizelge 3.7'de, yazılımın akış diyagramı ise şekil 3.3'de yer almaktadır.



Şekil 3.2 KAAN yazılımında kullanılan geometri

Çizelge 3.7 KAAN girdileri ve girdilerin birimleri, değer aralıkları ve tanımları

GİRDİ PARAMETRELERİ	**BİRİMLER**	**DEĞER ARALIKLARI**	**PARAMETRE TANIMLARI**
Analiz Tipi	-	-	Hesaplanacak analizleri belirleyen parametre
Atmosfer Tipi	-	-	Kullanılacak atmosfer tipini belirleyen parametre
Bağıl Nem	%	[0,100]	Bağıl nem oranı bilgisi. Atmosfer Tipi= Kullanıcı Tanımlı olduğunda kullanılır
Sıcaklık	^{o}C	[-273,inf)	Ortam sıcaklığı bilgisi. Atmosfer Tipi= Kullanıcı Tanımlı olduğunda kullanılır
Yol Sıcaklık Farkı	^{o}C	[-273,inf)	Yüksekliğe bağlı olarak değişen yol sıcaklığı bilgisi
Yol Tipi	-	-	Yol geometrisi bilgisi. Güneş hesaplamalarında sabit olarak EĞİK kullanılır
Menzil Başlangıç/Bitiş/Aralık	Km	(0,inf)	Hesaplamaların yapılacağı yolun uzunluğunu belirleyen parametre. Bitiş/Aralık bölümleri Analiz Tipi = Geçirgenlik olduğu durumda kullanılmaktadır
Yol Tepe (Zenith) Açısı	^{o}	[0,180]	Yol tepe açısı bilgisini içerir. Yol tipi = Eğik olduğu durumda kullanılır.

Çizelge 3.7 KAAN girdileri ve girdilerin birimleri, değer aralıkları ve tanımları (devam)

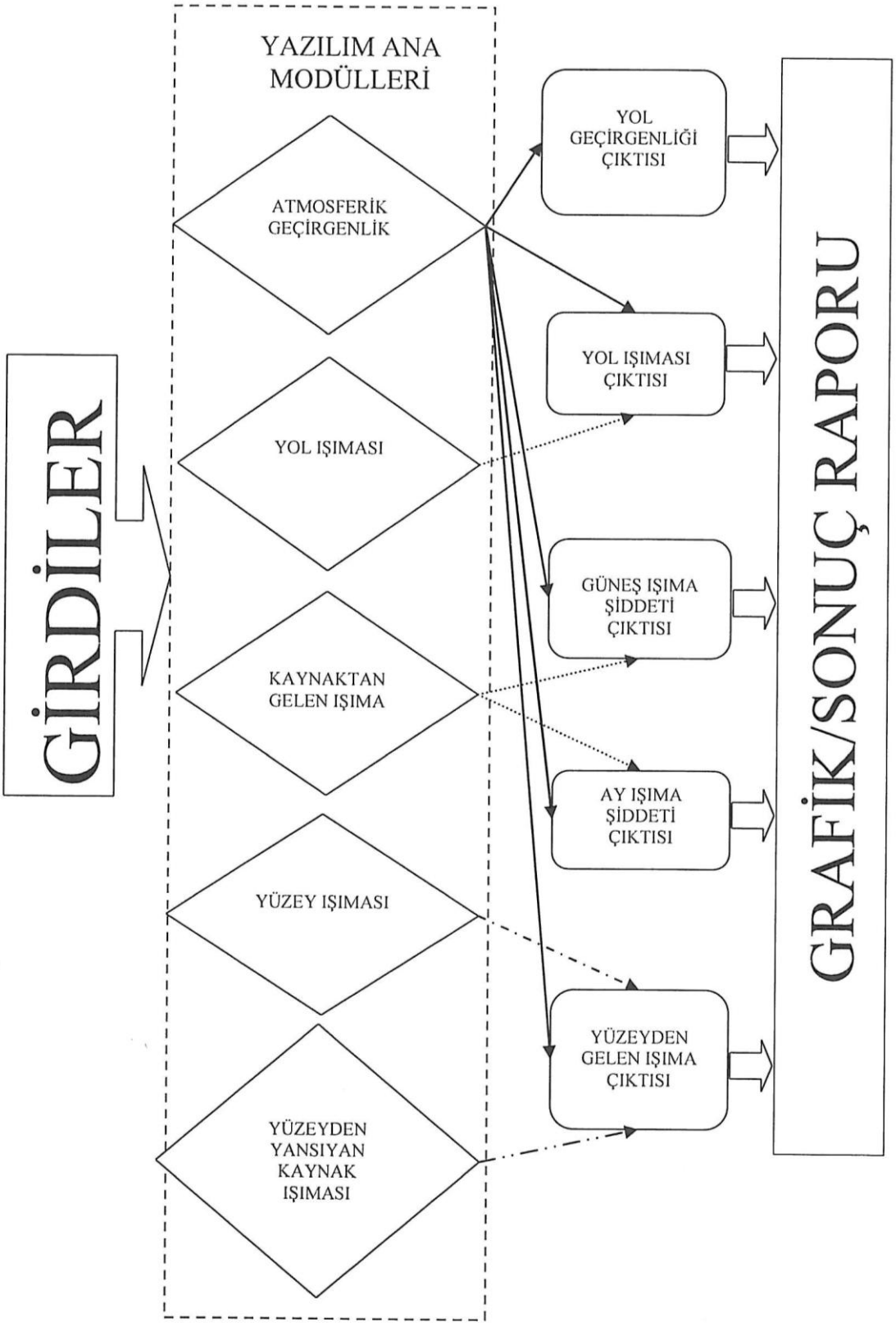
GİRDİ PARAMETRELERİ	**BİRİMLER**	**DEĞER ARALIKLARI**	**PARAMETRE TANIMLARI**
Yüzey Tipi / Yansıma Değeri	-	-	Yüzey bilgilerinin yer aldığı parametredir. Analiz Tipi = Hepsi ya da Güneş/Ay Işıması şiddeti, Yüzey Tipi = Kullanıcı Tanımlı, Yol Tepe Açısı > 90 olduğu durumda Yansıma Değeri kullanılmaktadır
Yüzey Sıcaklığı	^{o}C	[-273,inf)	Yüzey sıcaklığı bilgisi. Yol Tepe Açısı > 90 ve İrtifa = 0 olduğu durumda kullanılmaktadır.
İrtifa	Km	[0,100]	Yükseklik bilgisi
Yükseklik Korelasyon Tablosu	-	-	Yükseklikle değişen çoklu katmanları eşdeğer tek katman halinde modellemek için gerekli parametreler tablosu
Atmosfer Modeli	-	-	Yükseklikle değişen basınç durumu için kullanılacak atmosfer modeli
Dalgaboyu Bant/ Başlangıç/Bitiş	Mm	[1,14]	Dalgaboyu bilgisi = Bant kutusu işaretlendiğinde çalışılacak bant aralığı listeden seçilir.
Aerosol İçeriği	-	-	Aerosol bilgisi

Çizelge 3.7 KAAN girdileri ve girdilerin birimleri, değer aralıkları ve tanımları (devam)

GİRDİ PARAMETRELERİ	**BİRİMLER**	**DEĞER ARALIKLARI**	**PARAMETRE TANIMLARI**
Aerosol İrtifası	Km	[0,inf)	Aerosollerin etkin olduğu yükseklik
Aerosol Tipi	-	-	Aerosol İçeriği = Sis olduğu durumda kullanılır, Aerosol tipini belirler
Görüş Mesafesi	Km	[0,inf)	Görüş mesafesi bilgisi. Aerosol İçeriği = yağmur olduğu durumun dışındaki durumlarda kullanılmaktadır
Yağmur Tipi	-	-	Yağmur tipini belirler. Aerosol İçeriği = Yağmur olduğu durumda kullanılır
Yağmur Oranı	mm/h	[0,inf)	Yağmur oranını belirler. Aerosol İçeriği = Yağmur olduğu durumda kullanılır
Kaynak Tipi	-	-	Kaynak bilgisini içerir. Analiz Tipi = Hepsi ya da Güneş/Ay Işıması şiddeti seçildiğinde kullanılır.
Kaynak Tepe Açısı	^{o}C	[0,90]	Kaynak tepe açısı bilgisini içerir. Analiz Tipi = Hepsi ya da Güneş/Ay Işıması şiddeti,
Yüzey Yükselti / Yol-Kaynak Yanca Açısı Bağımlılığı	-	-	Yüzeyin yansıma ve yayınım durumundaki açı bağımlılıklarını belirler

Çizelge 3.7 KAAN girdileri ve girdilerin birimleri, değer aralıkları ve tanımları (devam)

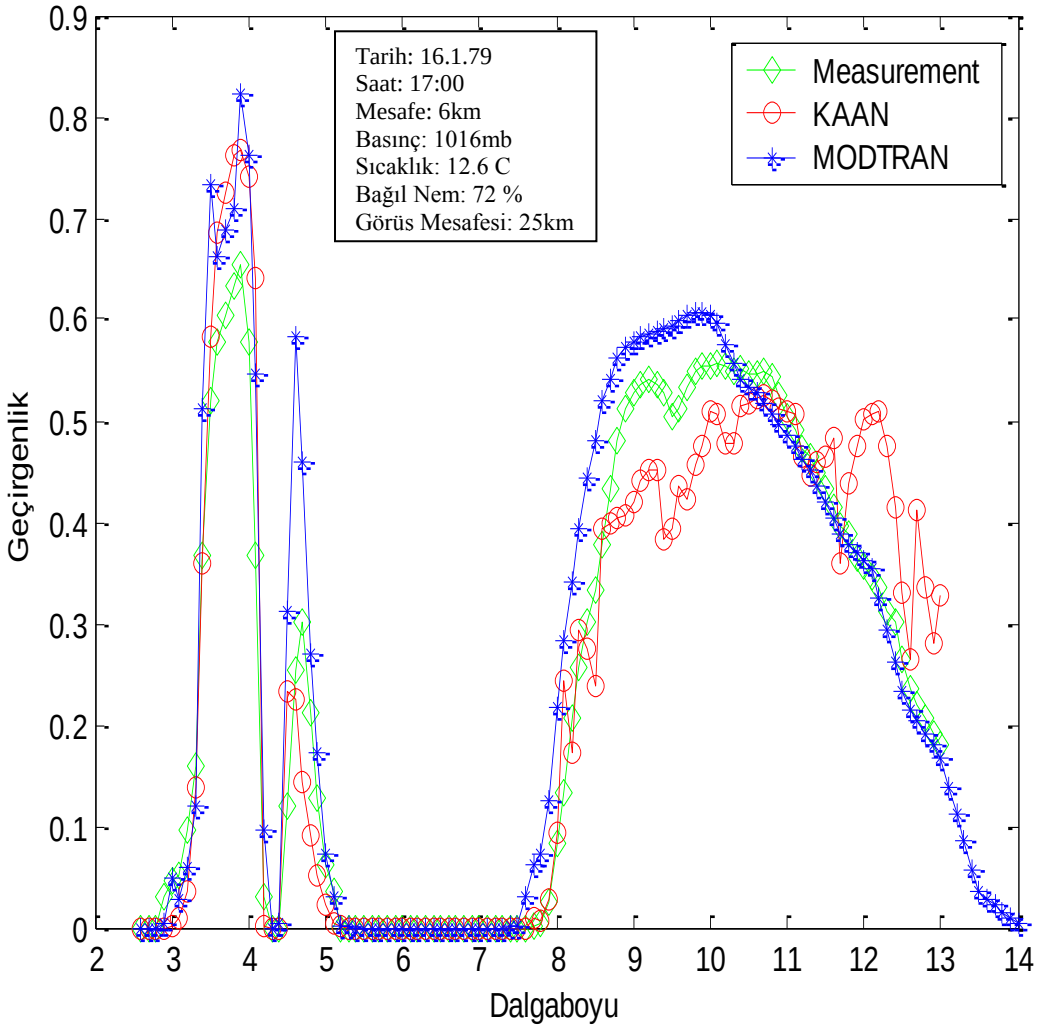
GİRDİ PARAMETRELERİ	**BİRİMLER**	**DEĞER ARALIKLARI**	**PARAMETRE TANIMLARI**
Yol-Kaynak Yanca Açısı	^{o}C	[-180,180]	Yol-kaynak arasındaki açı bilgisi. Yüzey Yükselti / Yol-Kaynak Yanca Açısı Bağımlılığı seçildiğinde kullanılır
Grafikler	-	-	Grafiklerin oluşturularak çıktı olarak gösterilmesi için kullanılmaktadır
Sonuç Raporu	-	-	Girdi ve çıktı parametrelerinin bir text dosyası olarak yazılması için kullanılmaktadır



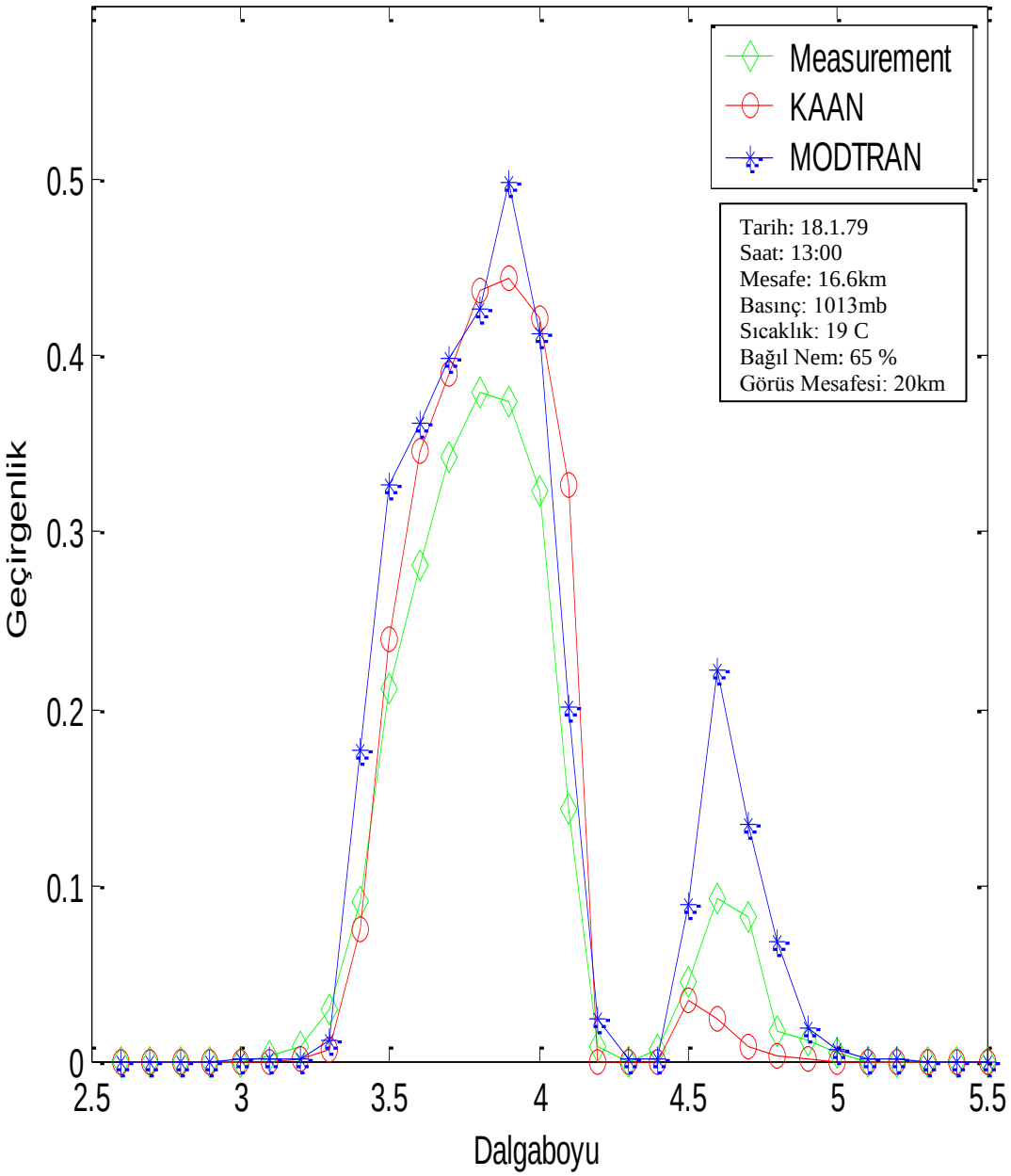
Şekil 3.3 KAAN yazılımı akış diyagramı

4. KAAN YAZILIMI DOĞRULAMA ÇALIŞMALARI

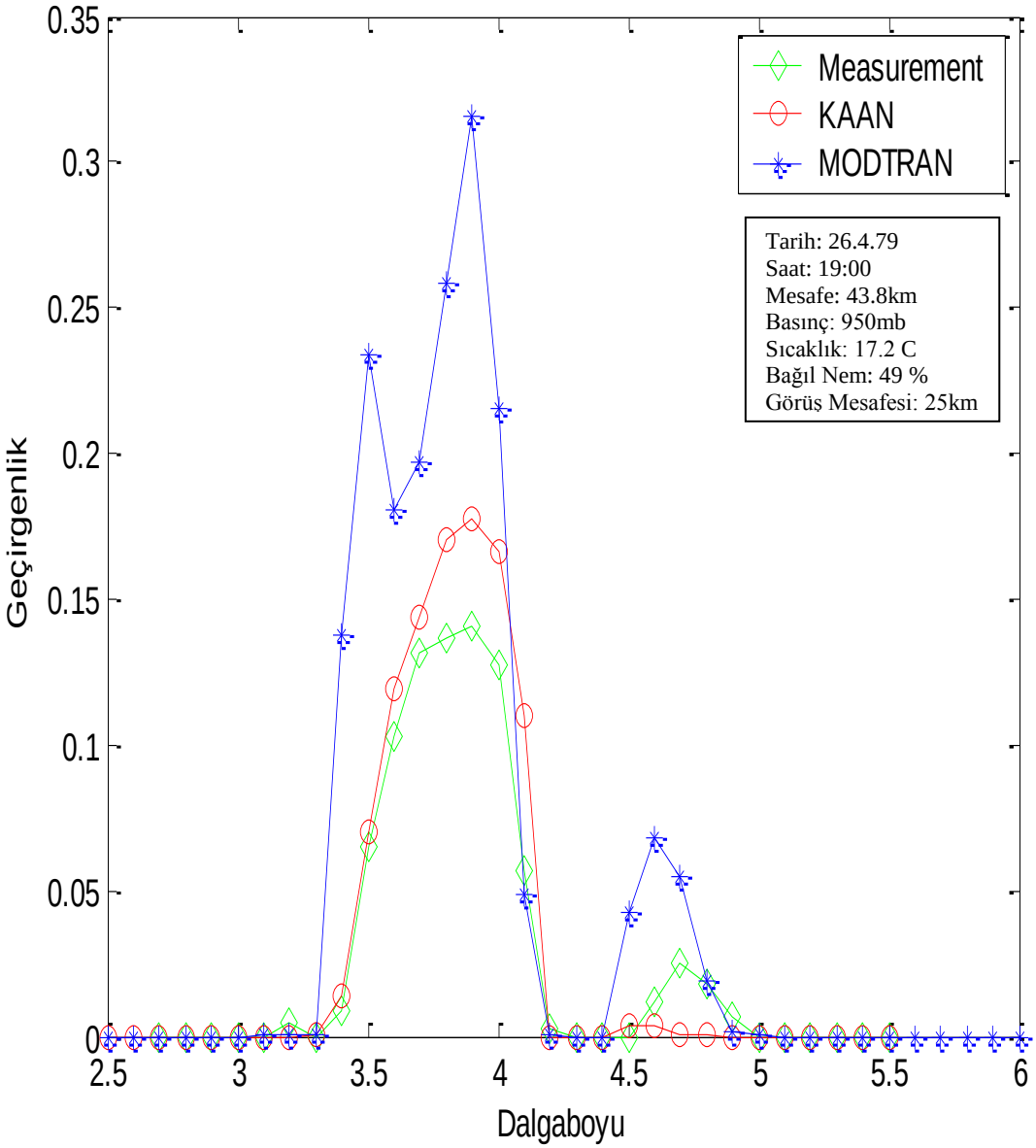
KAAN yazılımı doğrulama çalışmaları için çeşitli bölgelerde yapılmış atmosferik geçirgenlik ölçüm verileri kullanılmıştır. Bu veriler iki veri seti, yatay yol ve eğik yol olarak kullanılmıştır. Yatay veri setleri ile yapılan karşılaştırma ve elde edilen sonuçlar şekil 4.1-4.8 arasında gösterilmektedir. Eğik veri seti ile yapılan karşılaştırmaların sonuçları ise şekil 4.9'de gösterilmektedir.



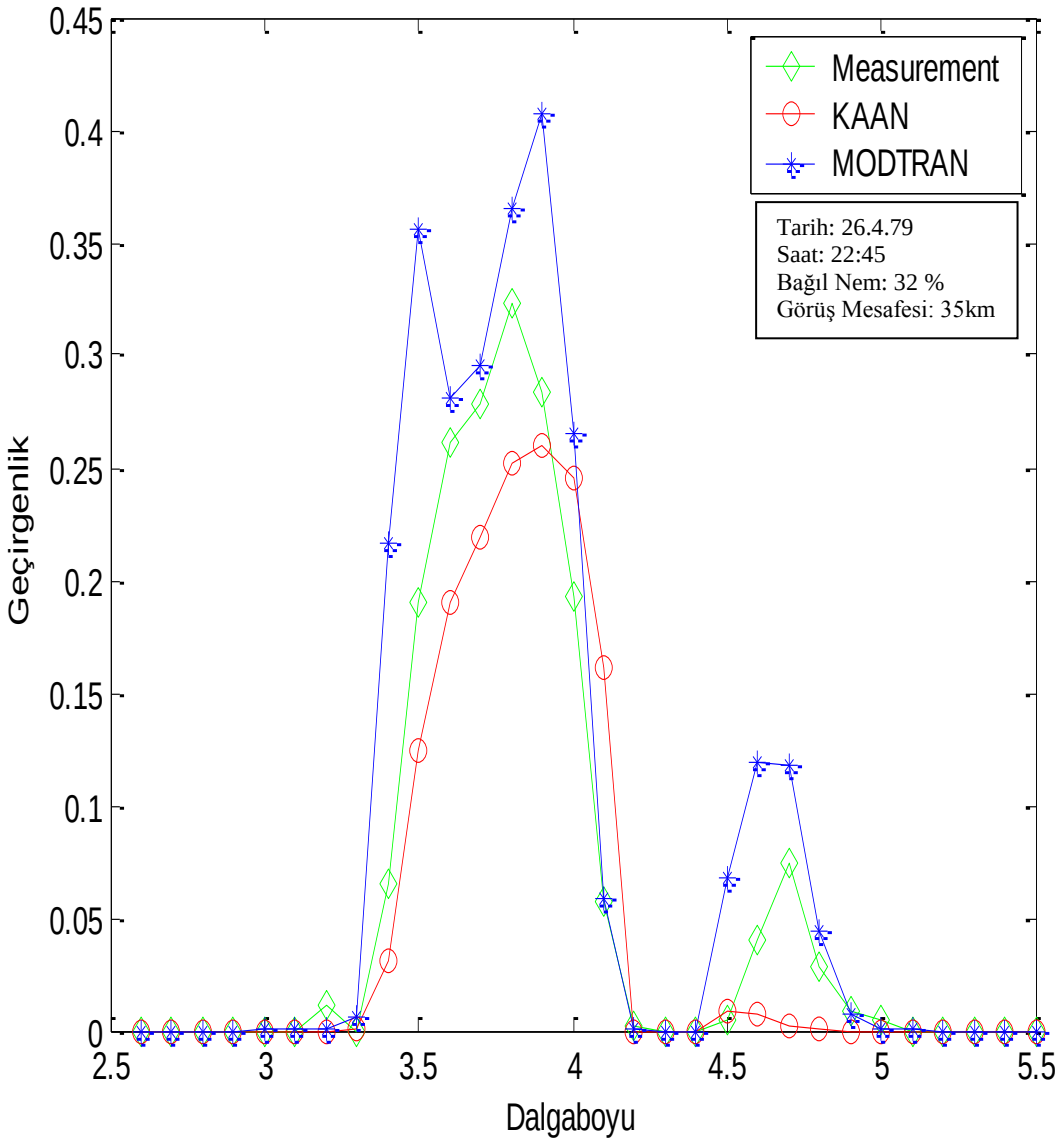
Şekil 4.1 Kentsel kıyı alanı (Urban Coastal Area), kuzeydoğu haifa, orta mesafe ölçümleri (Ben-Shalom vd. 1980)



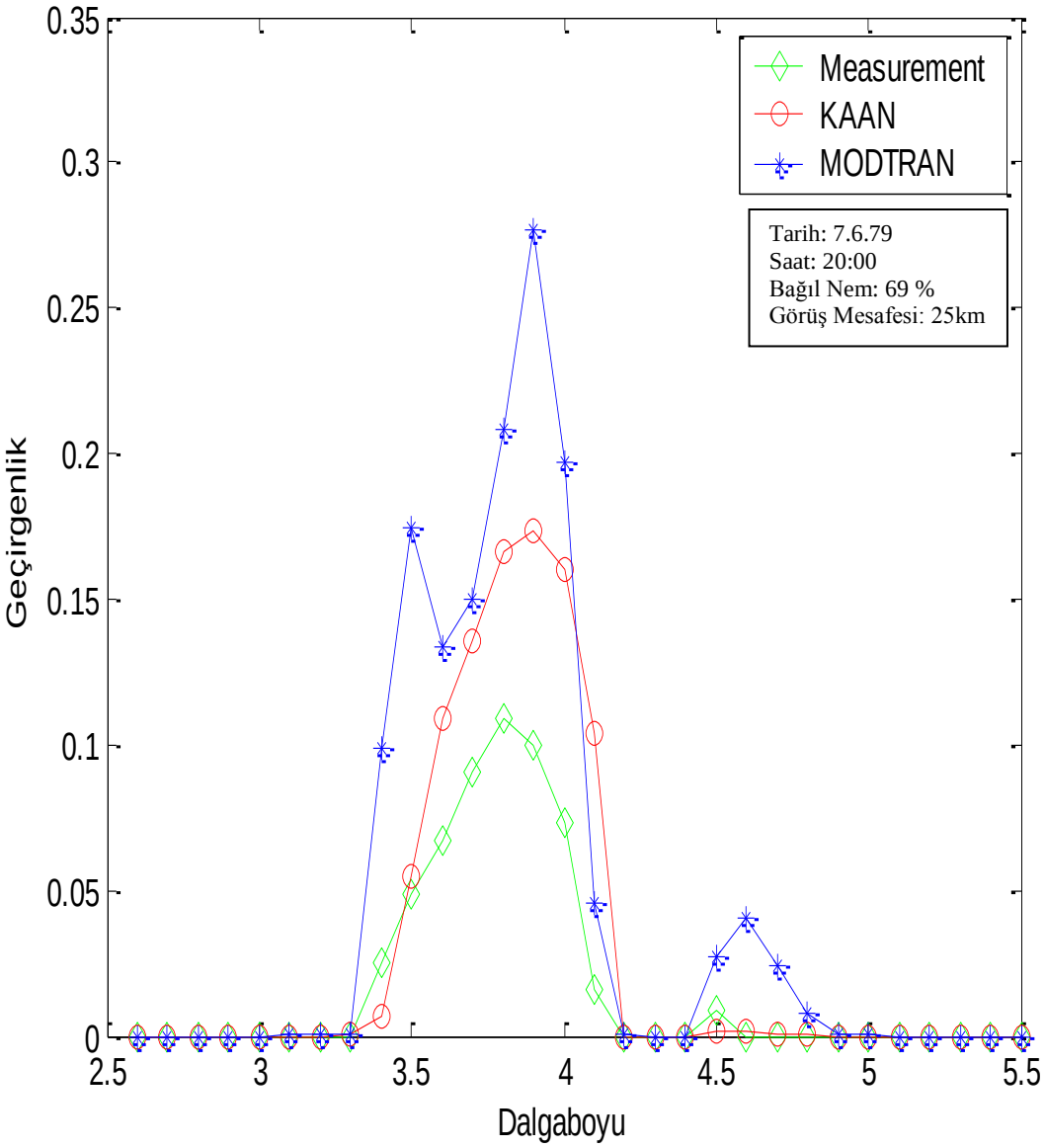
Şekil 4.2 Kentsel kıyı alanı (Urban Coastal Area), kuzeydoğu haifa, uzun mesafe ölçümleri (Ben-Shalom vd. 1980)



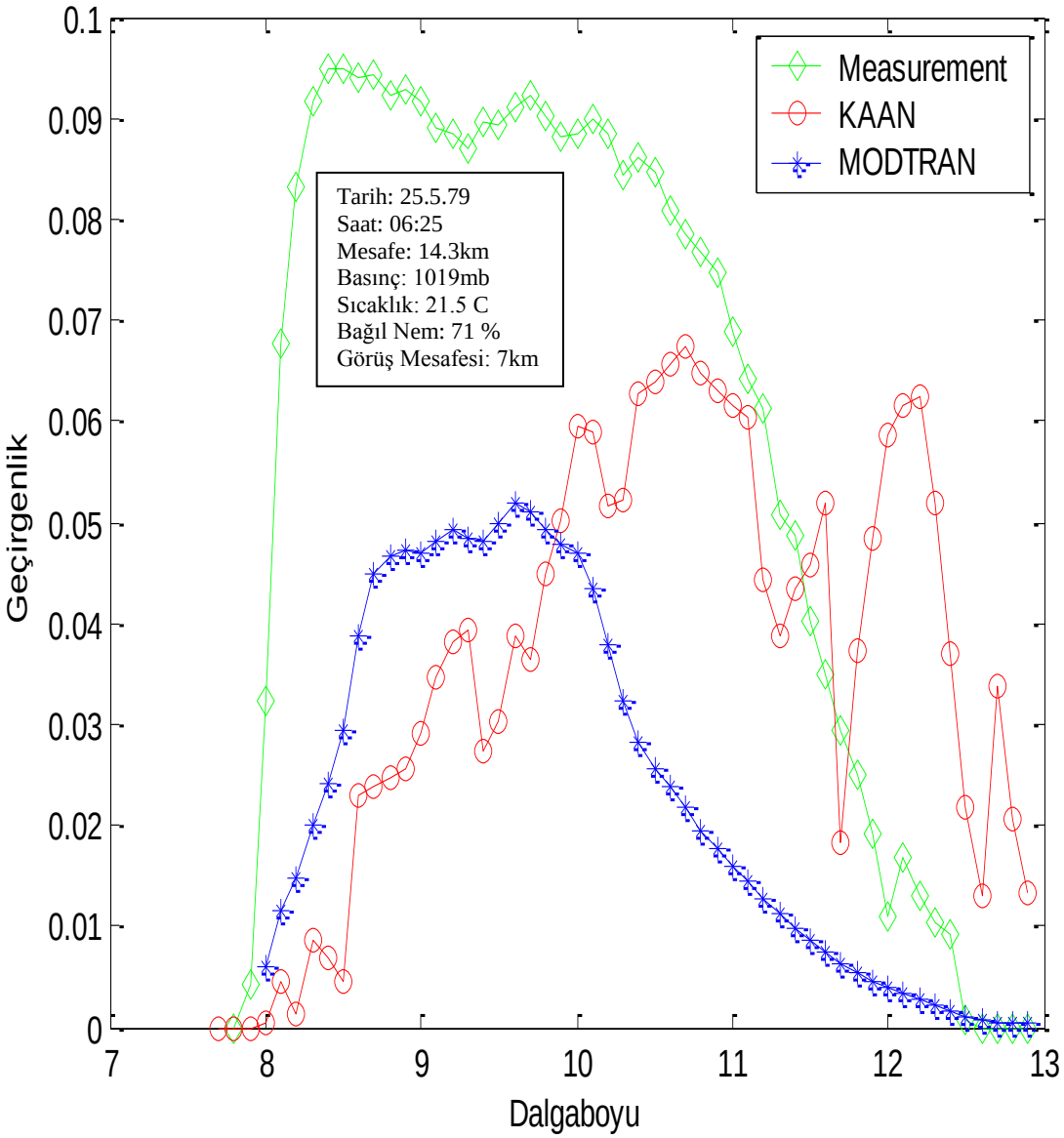
Şekil 4.3 Kırsal ortam (Rural Environment), orta nem durumu için çok uzun mesafe ölçümleri (Ben-Shalom vd. 1980)



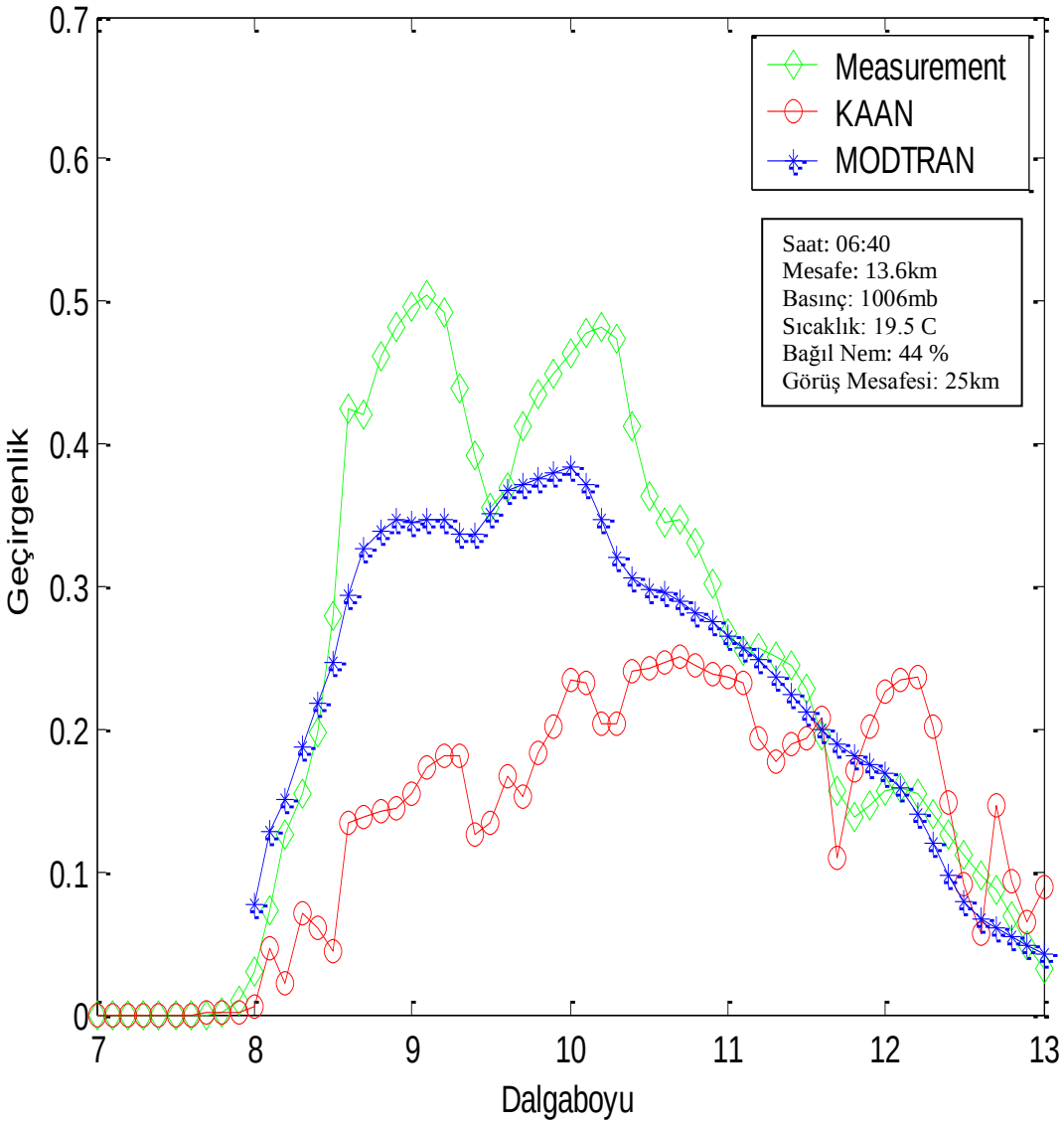
Şekil 4.4 Kırsal ortam (Rural Environment), düşük nem durumu için çok uzun mesafe ölçümleri (Ben-Shalom vd. 1980)



Şekil 4.5 Kırsal ortam (Rural Environment), yüksek nem durumu için çok uzun mesafe ölçümleri (Ben-Shalom vd. 1980)

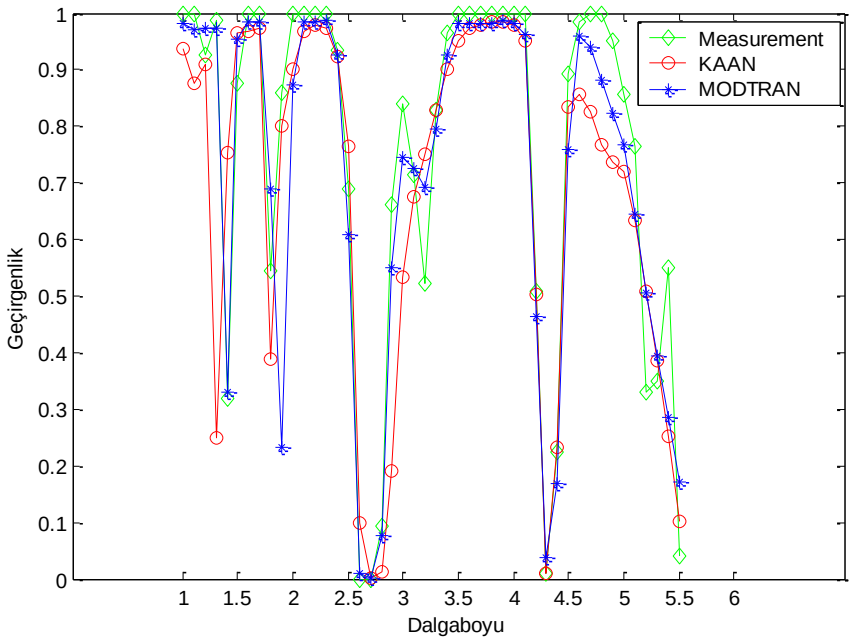


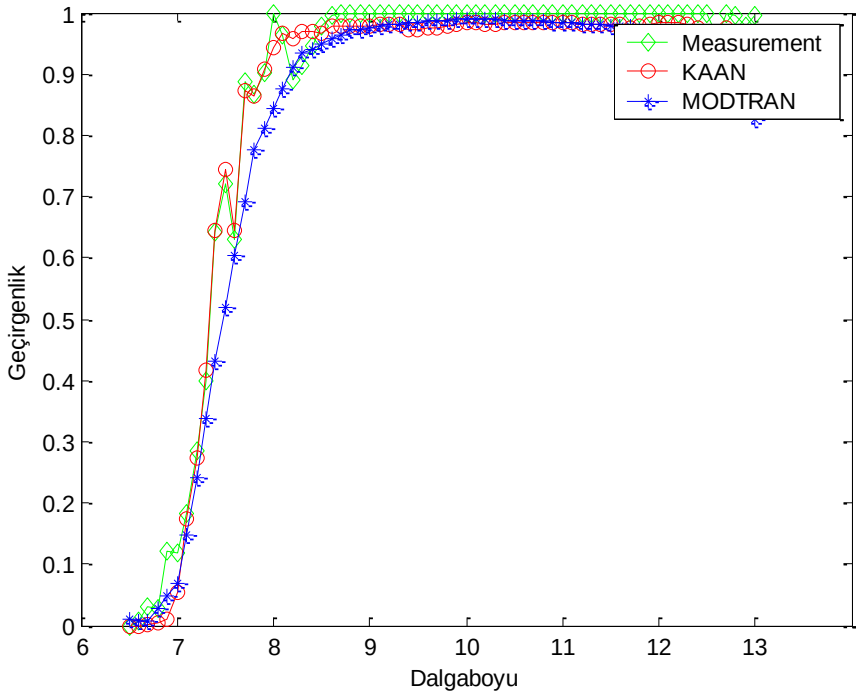
Şekil 4.6 Akdeniz sularında, uzun mesafe ölçümleri (Ben-Shalom vd. 1980)



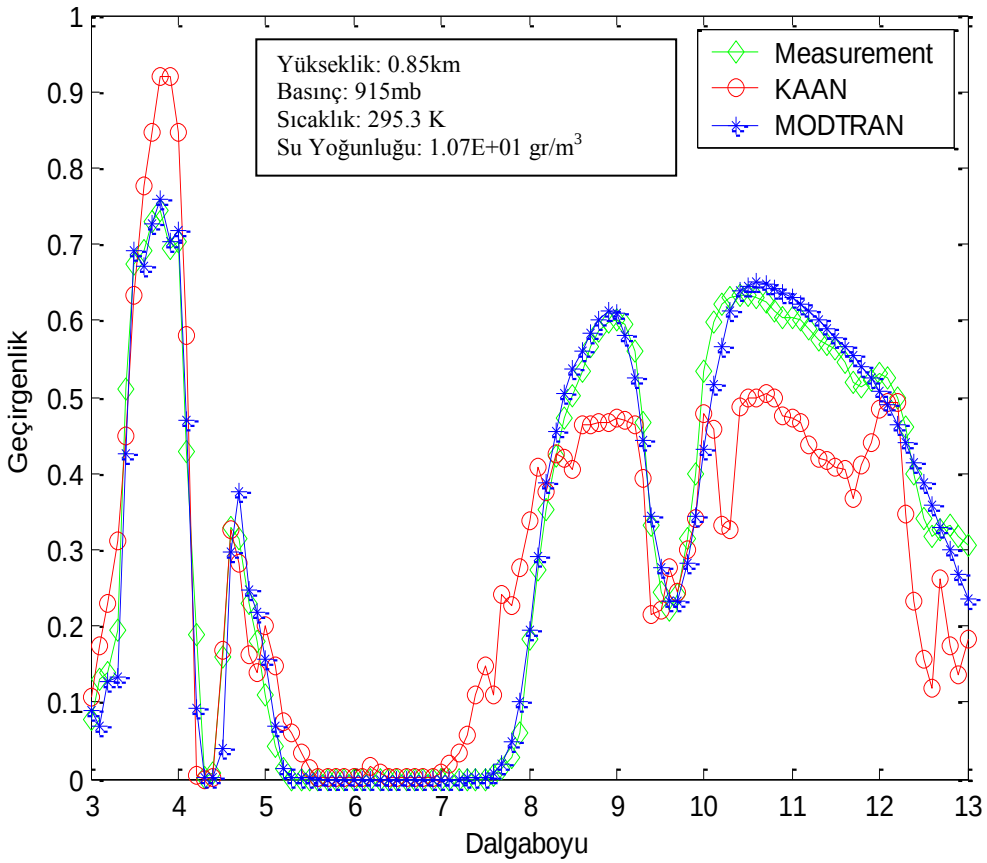
Şekil 4.7 Kızıldeniz sularında, uzun mesafe ölçümleri (Ben-Shalom vd. 1980)

Trans-mis-sion desig-nation	Path (km)	Tempera-ture (°C)	Humid-ity (%)	Visibil-ity (km)	Precip. water (cm)
A	0.3	2.8	62	35.4	3.6





Şekil 4.8 Deniz seviyesinde, kısa mesafe ölçümleri (Taylor ve Yates 1957)



Şekil 4.9 Mitzpe' Ramon (Güney İsrail-Negev) bölgesinde çok uzun mesafe eğik yol durumu ölçümleri (Devir 2002)

Ölçümlerden elde edilen veriler ile KAAN ve MODTRAN yazılımlarının hesaplamaları sonucunda elde edilen veriler ilgili grafiklerdeki toplam dalgaboyu ortalaması üzerinden ölçüm verileri ile orantısal olarak karşılaştırıldığında çizelge 4.1'de yer alan sonuçlar elde edilmektedir.

Çizelge 4.1 KAAN ve MODTRAN sonuçlarının ölçüm verileri ile karşılaştırılması

	Şekil 4.1	Şekil 4.2	Şekil 4.3	Şekil 4.4	Şekil 4.5	Şekil 4.6	Şekil 4.7	Şekil 4.8	Şekil 4.9
KAAN	0.016	0.124	0.168	0.177	0.694	0.372	0.419	0.080 0.018	0.086
MODTRAN	0.136	0.378	0.762	0.431	1.568	0.614	0.142	0.047 0.047	0.066

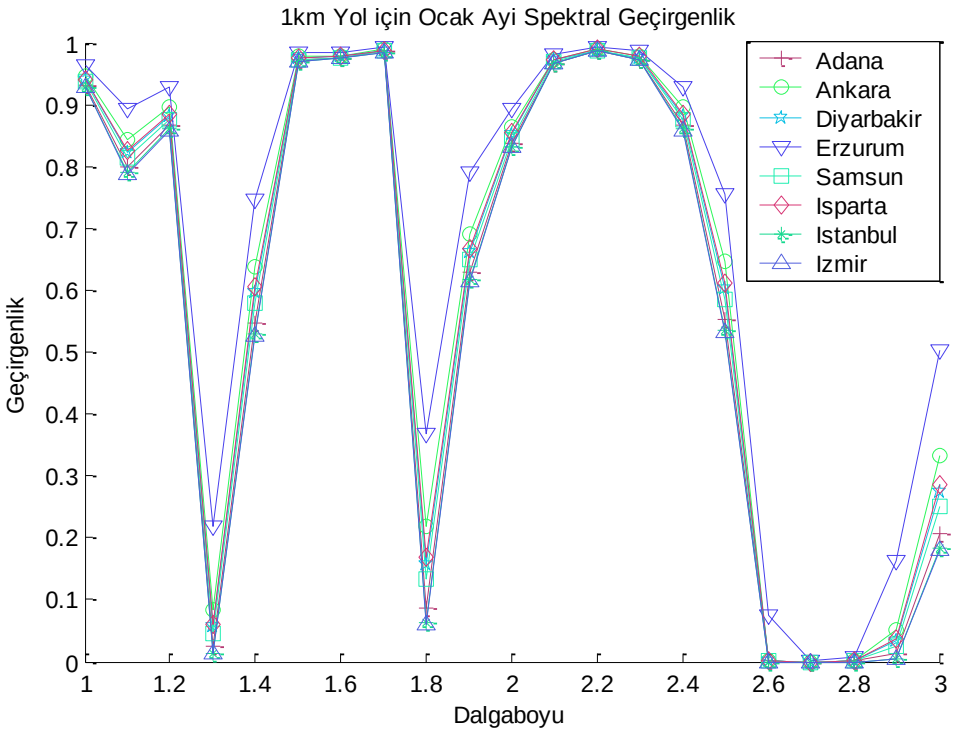
MWIR bandında KAAN yazılımının MODTRAN yazılımına kıyasla ölçüm verilerine çok daha yakın ve karakteristik açıdan uyumlu sonuçlar verdiği, SWIR ve LWIR bantlarında ise ölçüm verilerine oranla her iki yazılımın da nispeten birbirleri ile yakın değerler verdiği görülmektedir. Öte yandan, LWIR bandı için 9 μm yakınlarından 13 μm değerine kadar olan dalgaboyu aralığında MODTRAN yazımı sonuçları KAAN yazılımına kıyasla daha yakın sonuçlar verdiği fakat geçirgenlik eğrisinin karakteristik açıdan KAAN yazılımında daha uyumlu olduğu görülmektedir. Karşılaştırma yapılırken KAAN yazılımda spektrumda emilimler görülürken MODTRAN yazılımında görülmemektedir. MODTRAN yazılımındaki dalgasayısı üzerinden çözünürlüğün KAAN yazılımı ile eşdeğer çözünürlükte olması için kullanılan yaklaşımların bu durumda etkili olduğu ve karşılaştırma esnasında bu durumun da göz önünde bulundurulması gerektiği değerlendirilmektedir. Toplam dalgaboyu ortalaması üzerinden yapılan karşılaştırmada önem teşkil edebilir. Genel olarak kızılötesi bantların tümü (13 μm dalgaboyuna kadar) düşünüldüğünde KAAN yazılımı da MODTRAN yazılımı da ölçüm verileri ile uyumlu sonuçlar vermekte ve her iki yazılım da kızılötesi uygulamalarda kullanılabilecek yeterliliğe sahip oldukları değerlendirilmektedir.

5. TÜRKİYE KIZILÖTESİ ATMOSFERİK ARKAPLAN MODELİ

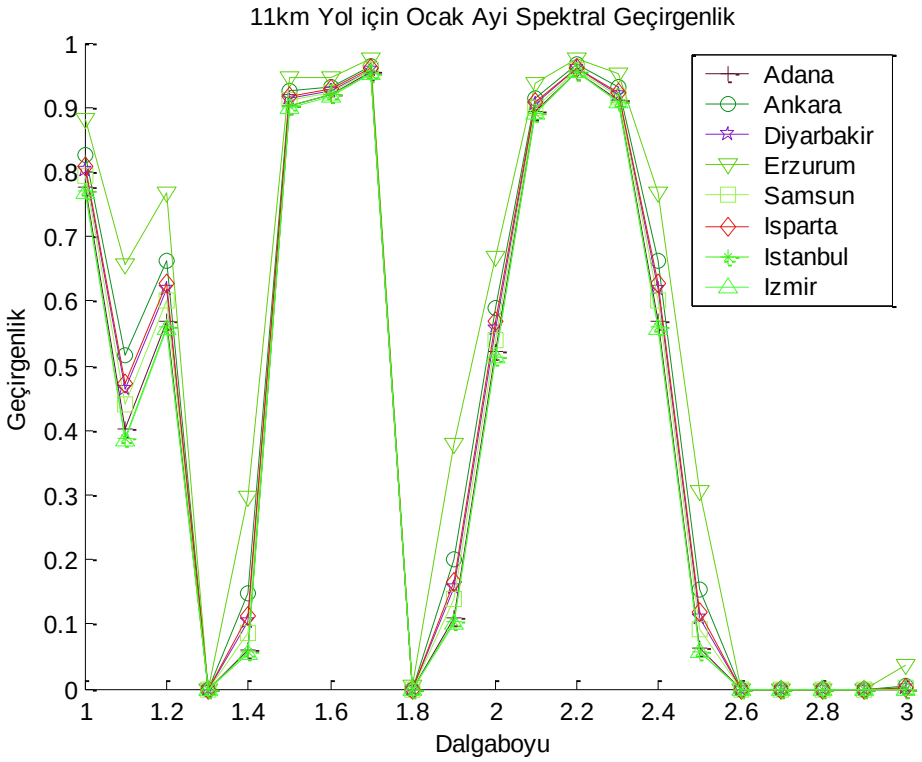
Türkiye kızılötesi atmosferik arkaplan modelleme çalışmaları kapsamında 8 ilin meterolojik verileri ve tez kapsamında hazırlanan KAAN yazılımı kullanılmıştır. Seçilen iller farklı bölge ve deniz seviyesinden yükseklikleri göz önüne alınarak belirlenmiştir. Modelleme kapsamında yapılan çalışmalarda literatürde yer alan çalışmaların genelinde olduğu şekilde yaz ve kış olarak iki mevsim üzerinden hesaplamalar yapılmıştır. Bu iki mevsim için en uygun ayların Ocak ve Temmuz ayları olduğu değerlendirilmiştir. Modelleme çalışmaları, kızılötesi elektro-optik sistemlerin genelinde kullanılan SWIR, MWIR ve LWIR dalgaboylarında ve kısa, orta ve uzun mesafeler olarak belirlenen 3 farklı yatay mesafe için yapılmıştır. Kullanılan meterolojik veriler, farklı yıllarda ölçülmüş aylık ortalama verilerin ortanca verileridir. Bu verilerin yıllık değerleri illere göre çizelge 5.1'de yer almaktadır. Yapılan çalışmalar sonucunda elde edilen Türkiye atmosferik geçirgenlik değerlerinin spektral olarak yer aldığı grafikler şekil 5.1-5.18 arasında, bant toplamı olarak yer aldığı grafikler ise şekil 5.19-5.24'de gösterilmektedir. Bunun yanı sıra, KAAN yazılımı ile hesaplanabilecek diğer etkenlere örnek olarak Adana için yol ışıması ve güneş ışıması hesaplamaları sonucunda elde edilen verilere ait grafikler de sırasıyla şekil 5.25 ve şekil 5.26'da gösterilmektedir.

Çizelge 5.1 İllere göre kullanılan meteorolojik veriler

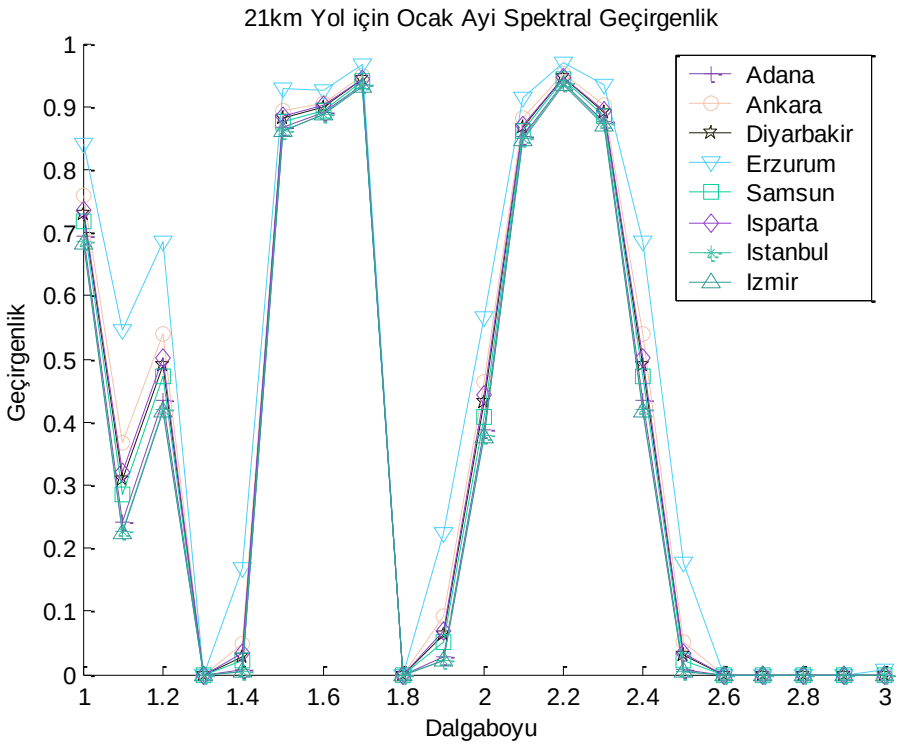
İl	İrtifa (m)	Yıl	Basınç (mbar)	Nem (%)	Sıcaklık (^{o}C)	Ay
Adana	0	2001-2009	1023	63.5	6.3	Ocak
Adana	0	2001-2009	1007	77.7	25.6	Temmuz
İstanbul	0	2001-2009	1028	69.3	6	Ocak
İstanbul	0	2001-2009	1014	58	25.4	Temmuz
İzmir	0	2001-2009	1024	60	8.5	Ocak
İzmir	0	2001-2009	1010	43.1	27	Temmuz
Samsun	0	2001-2009	1030.5	59.7	5.1	Ocak
Samsun	0	2001-2009	1016.5	73.7	23.7	Temmuz
Diyarbakır	675	2001-2009	950	75	1.1	Ocak
Diyarbakır	675	2001-2009	934	19	30.9	Temmuz
Isparta	1000	2001-2009	910	73.9	1.05	Ocak
Isparta	1000	2001-2009	903	47.8	21.2	Temmuz
Ankara	891	2005-2010	916	45.5	23.9	Temmuz
Ankara	891	2005-2010	922.1	77.1	-2.25	Ocak
Erzurum	1869	2008-2009	832.7	62.25	-8.65	Ocak
Erzurum	1869	2008-2009	821.3	52.45	18.35	Temmuz



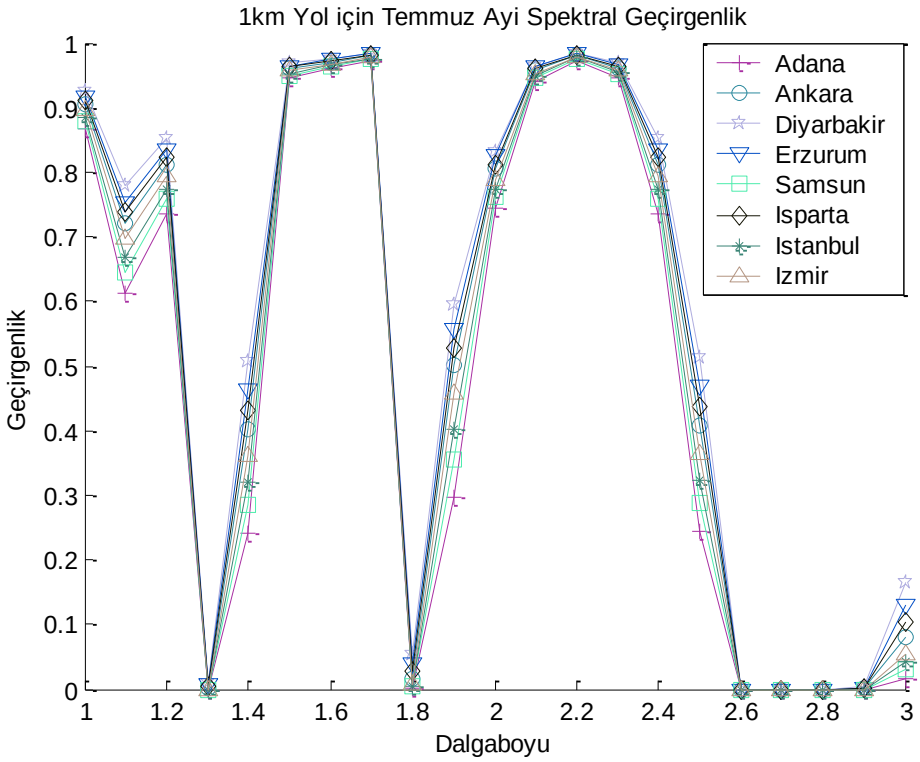
Şekil 5.1 Türkiye atmosfer modeli spektral geçirgenlik grafiği



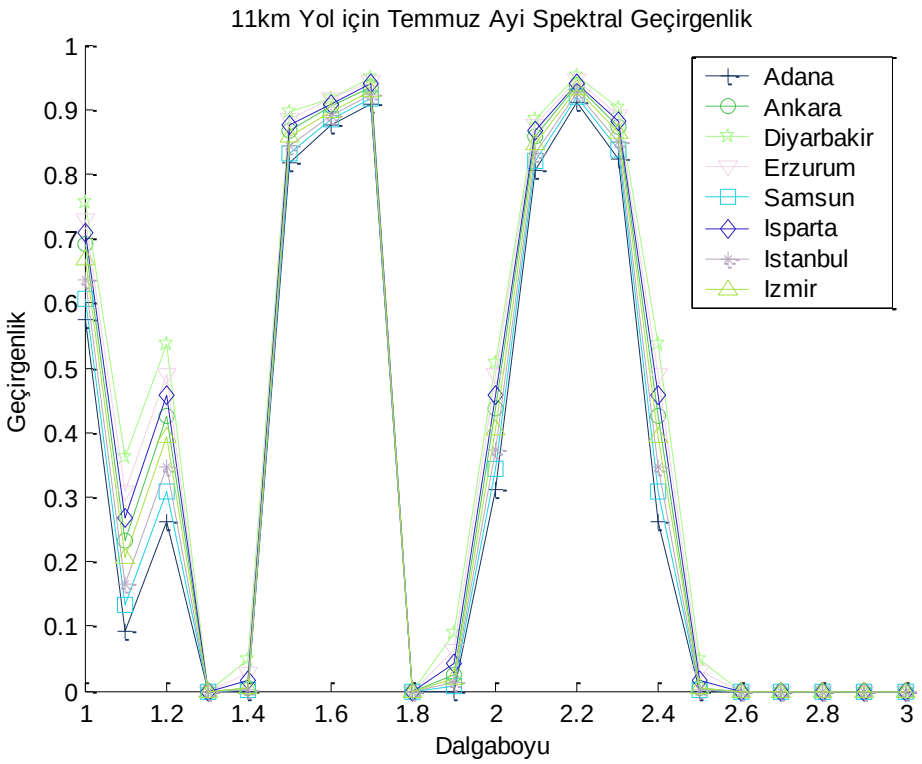
Şekil 5.2 Türkiye atmosfer modeli spektral geçirgenlik grafiği



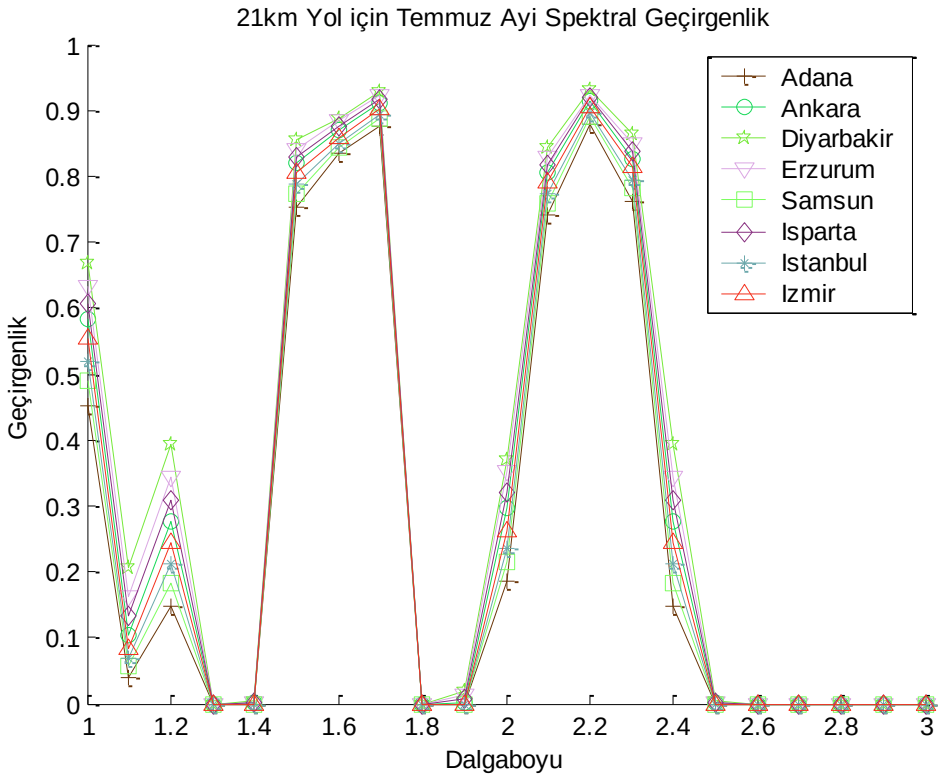
Şekil 5.3 Türkiye atmosfer modeli spektral geçirgenlik grafiği



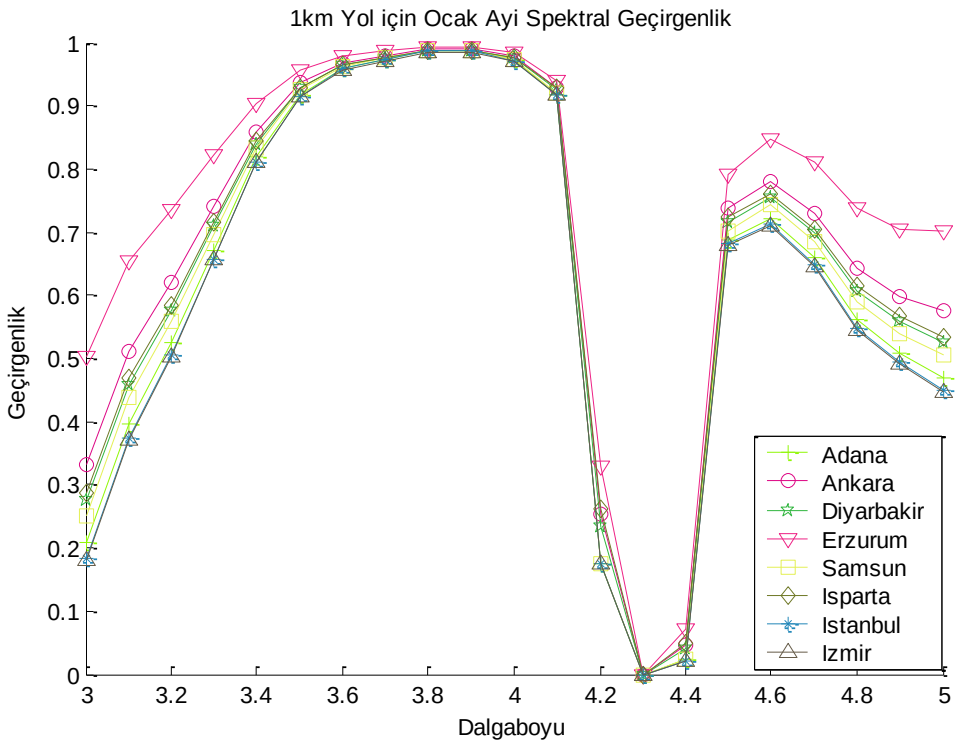
Şekil 5.4 Türkiye atmosfer modeli spektral geçirgenlik grafiği



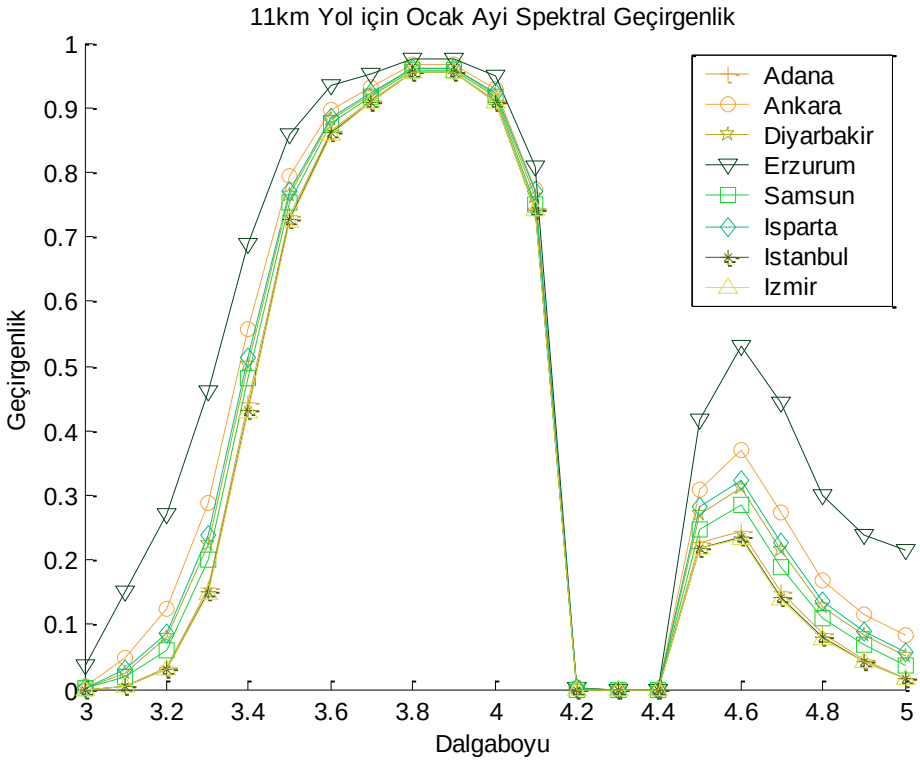
Şekil 5.5 Türkiye atmosfer modeli spektral geçirgenlik grafiği



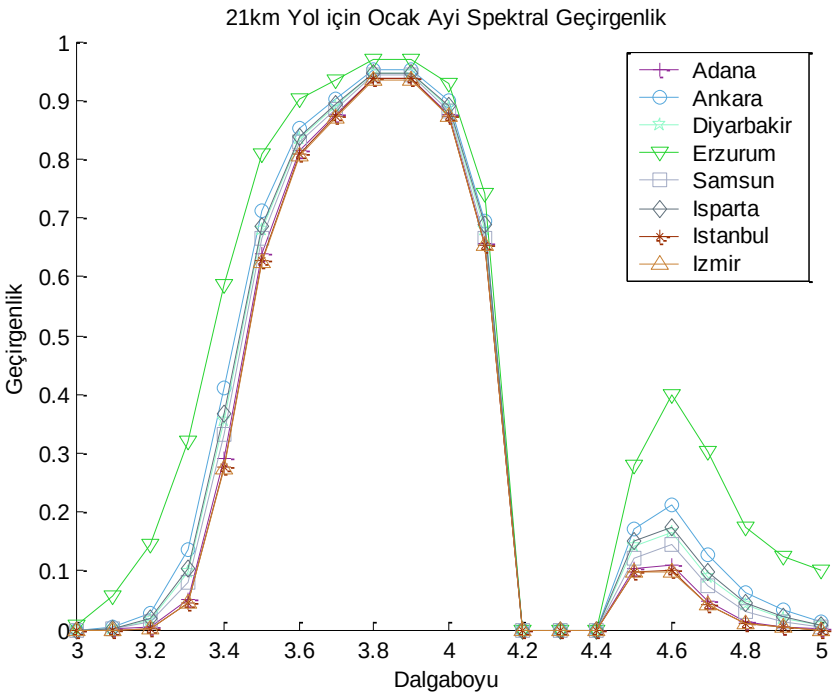
Şekil 5.6 Türkiye atmosfer modeli spektral geçirgenlik grafiği



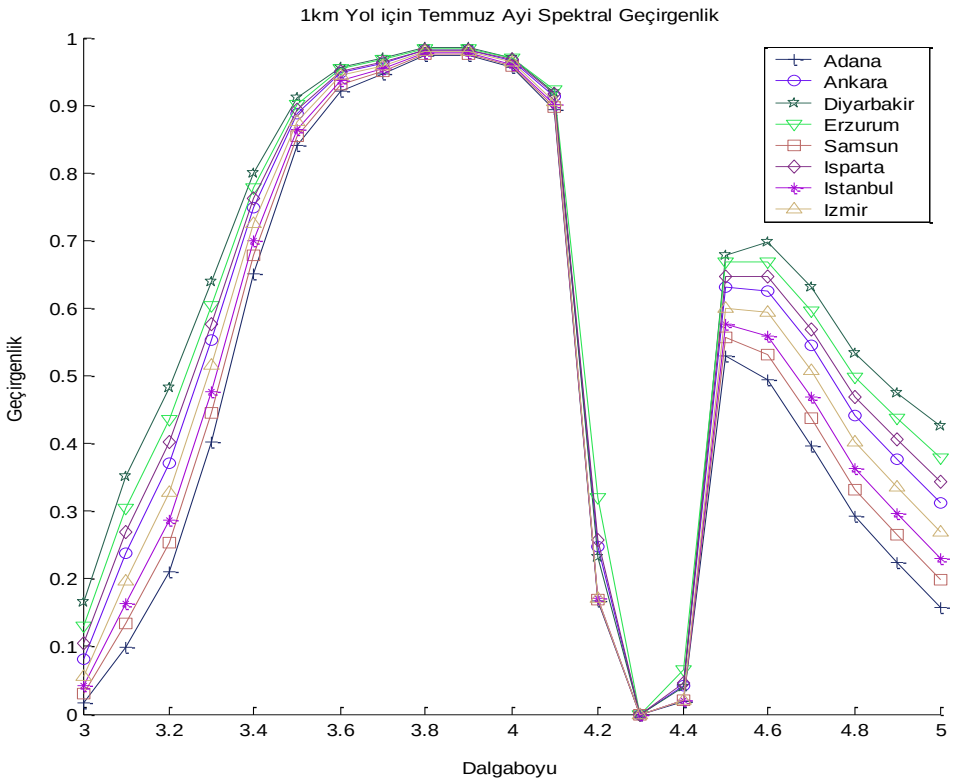
Şekil 5.7 Türkiye atmosfer modeli spektral geçirgenlik grafiği



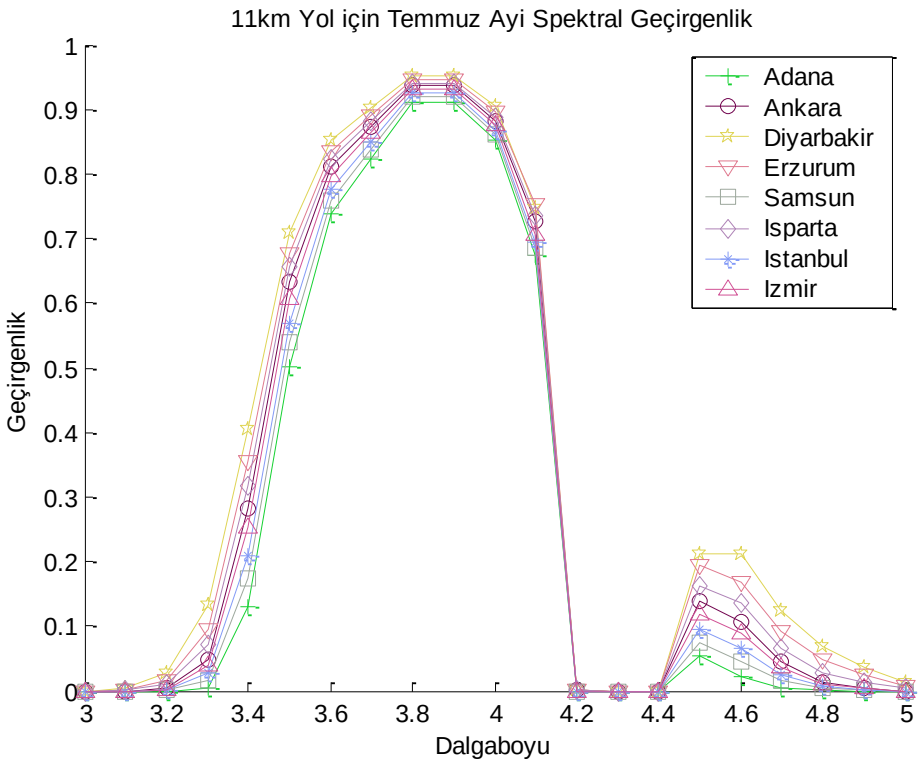
Şekil 5.8 Türkiye atmosfer modeli spektral geçirgenlik grafiği



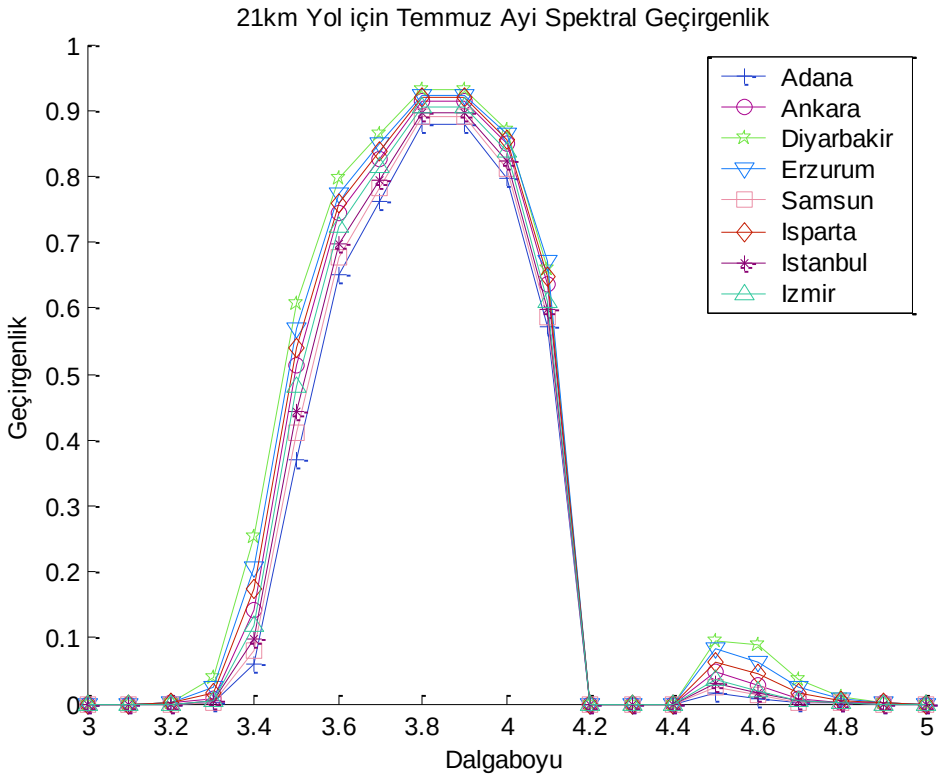
Şekil 5.9 Türkiye atmosfer modeli spektral geçirgenlik grafiği



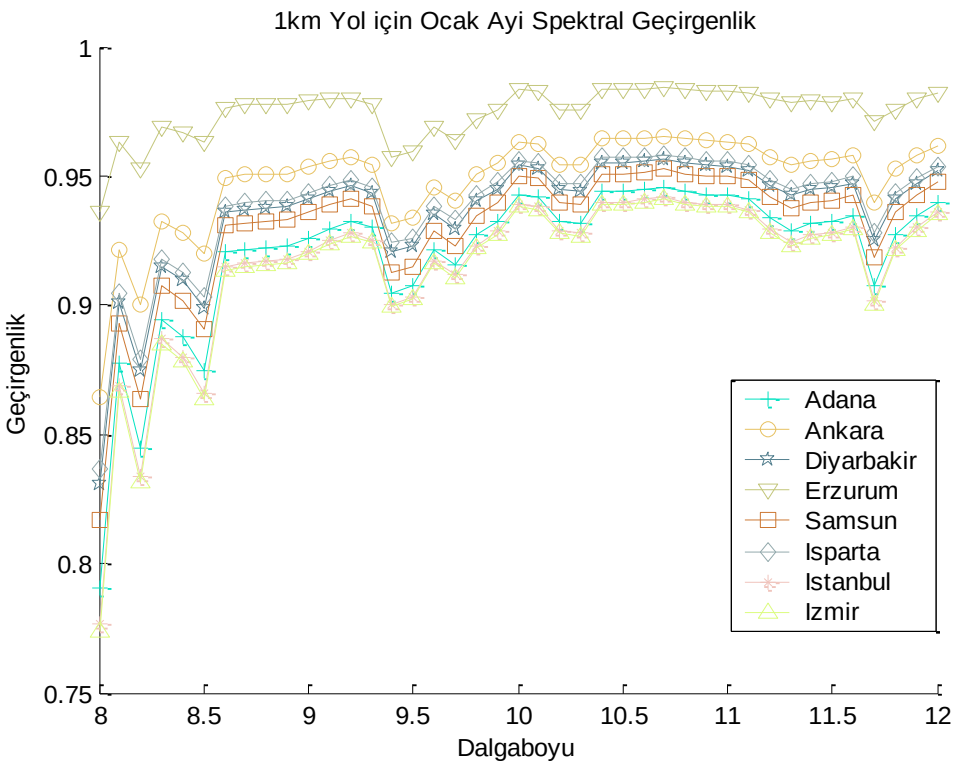
Şekil 5.10 Türkiye atmosfer modeli spektral geçirgenlik grafiği



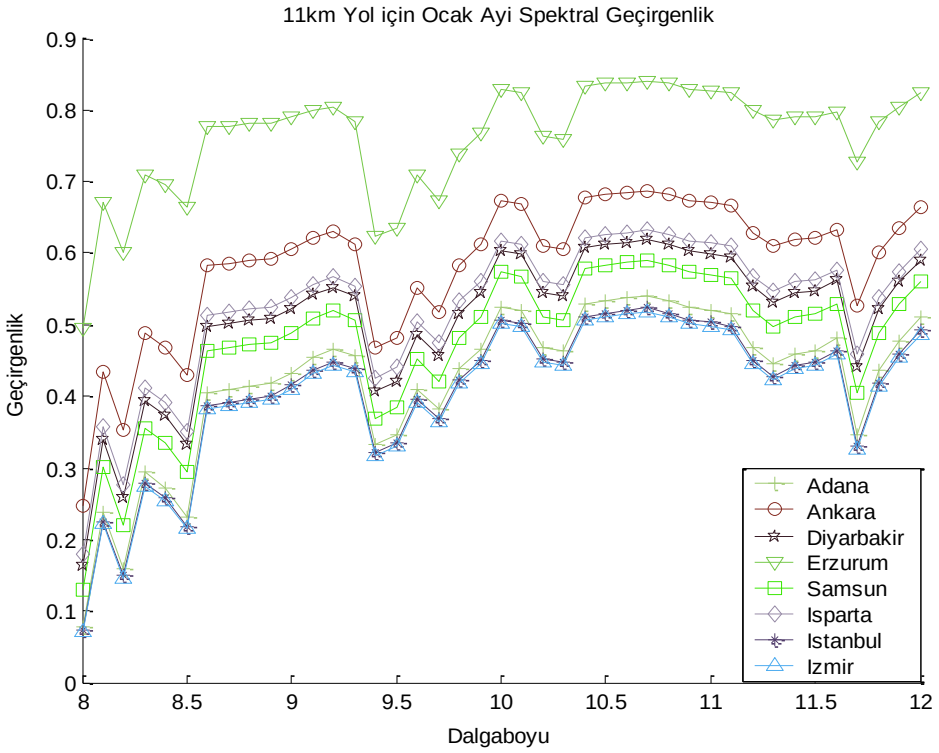
Şekil 5.11 Türkiye atmosfer modeli spektral geçirgenlik grafiği



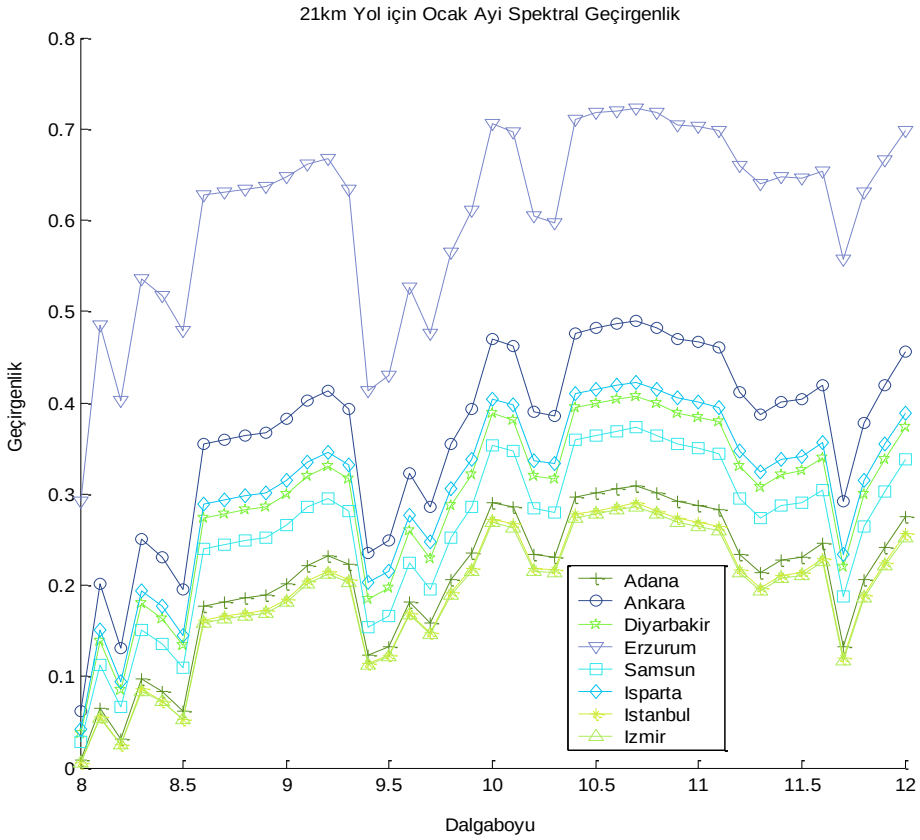
Şekil 5.12 Türkiye atmosfer modeli spektral geçirgenlik grafiği



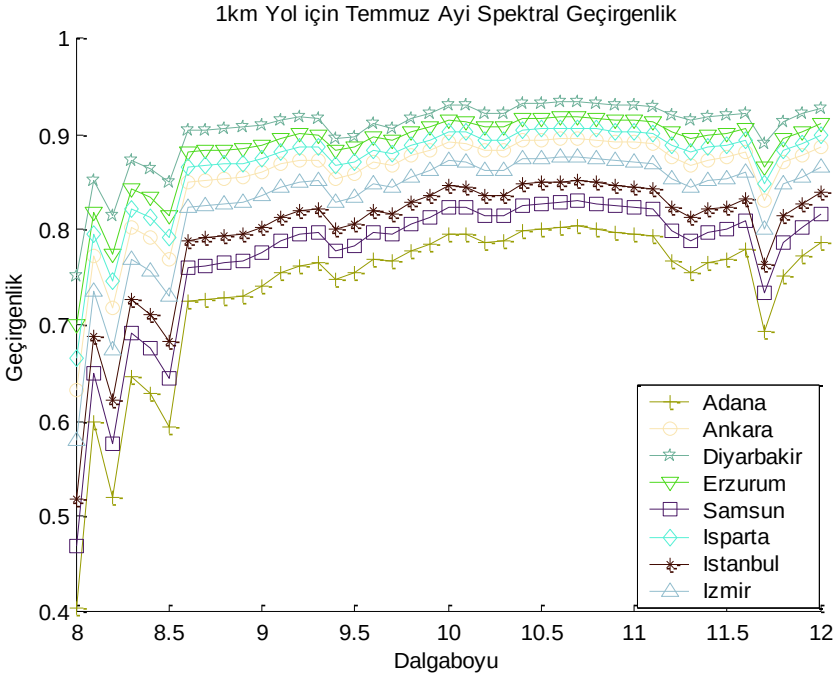
Şekil 5.13 Türkiye atmosfer modeli spektral geçirgenlik grafiği



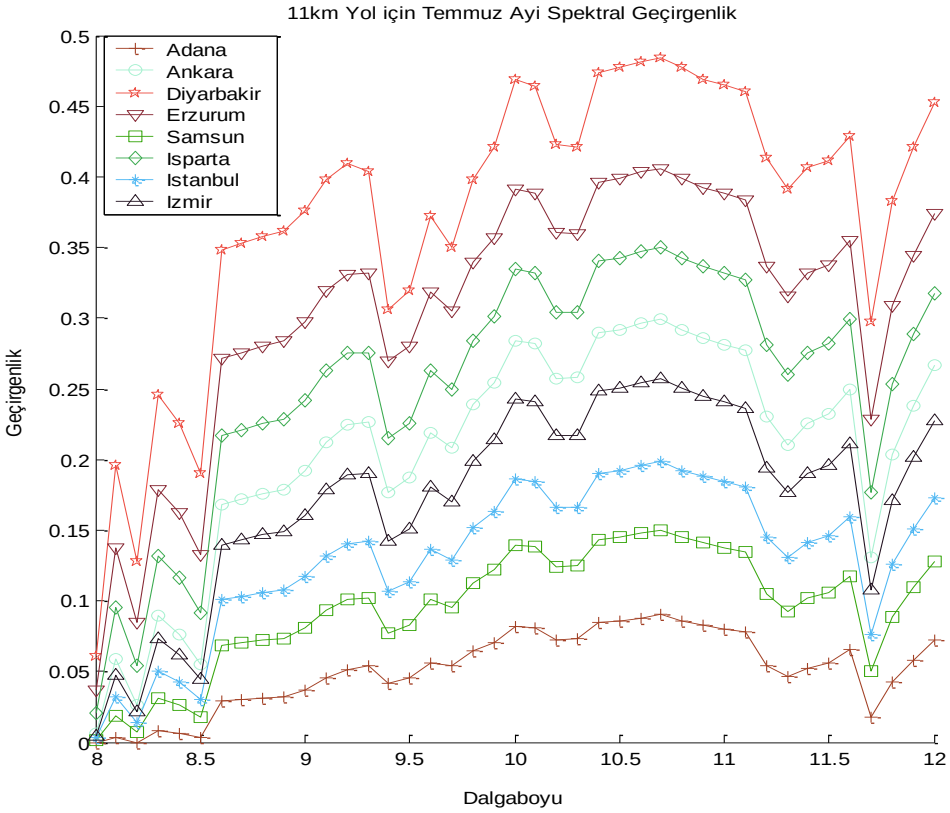
Şekil 5.14 Türkiye atmosfer modeli spektral geçirgenlik grafiği



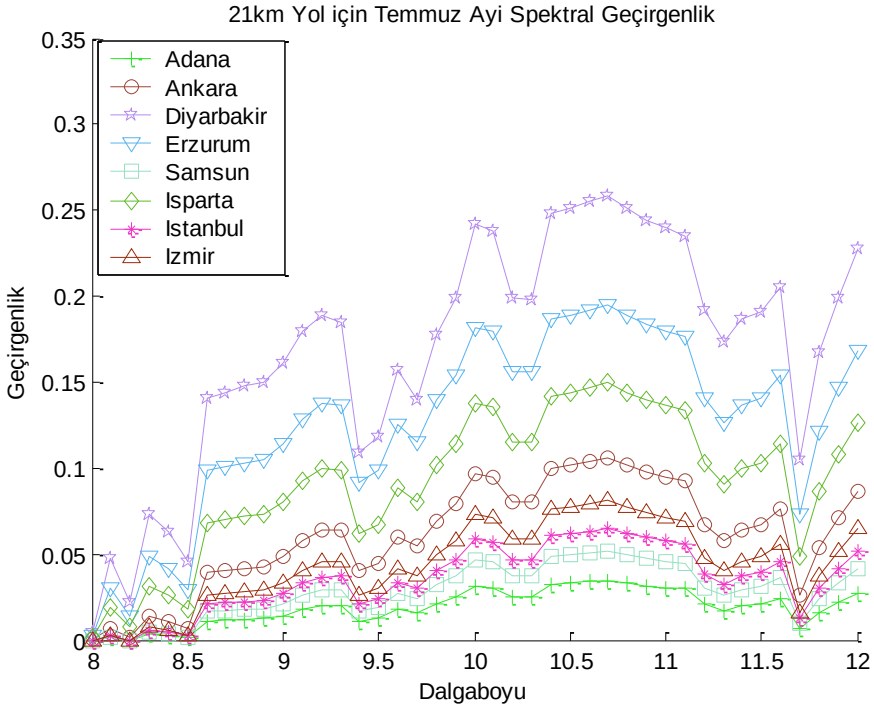
Şekil 5.15 Türkiye atmosfer modeli spektral geçirgenlik grafiği



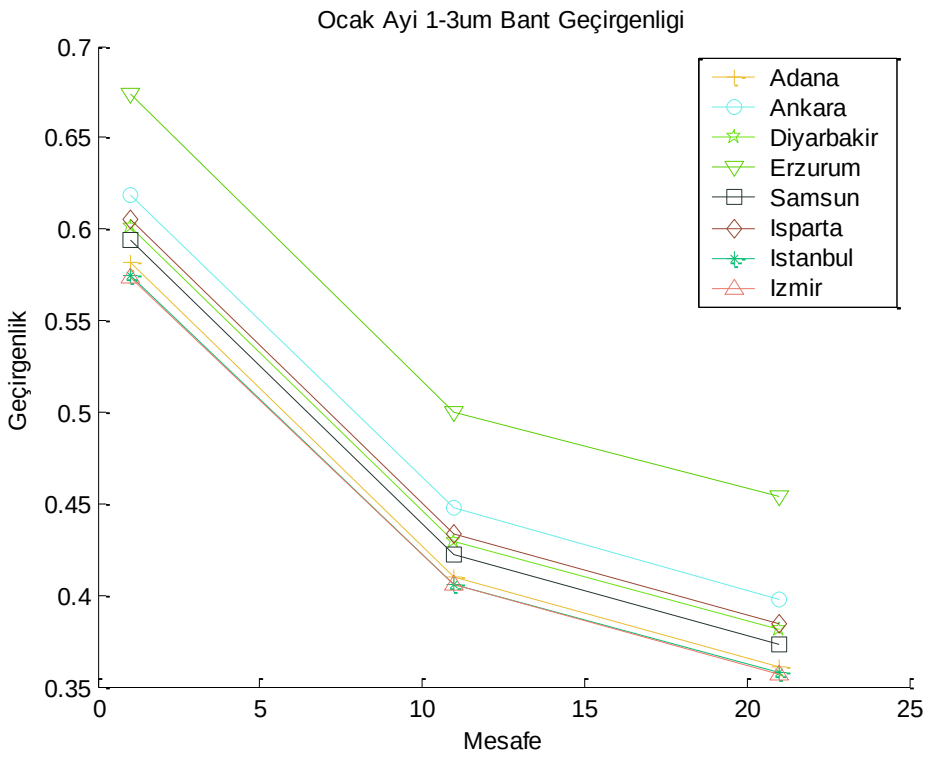
Şekil 5.16 Türkiye atmosfer modeli spektral geçirgenlik grafiği



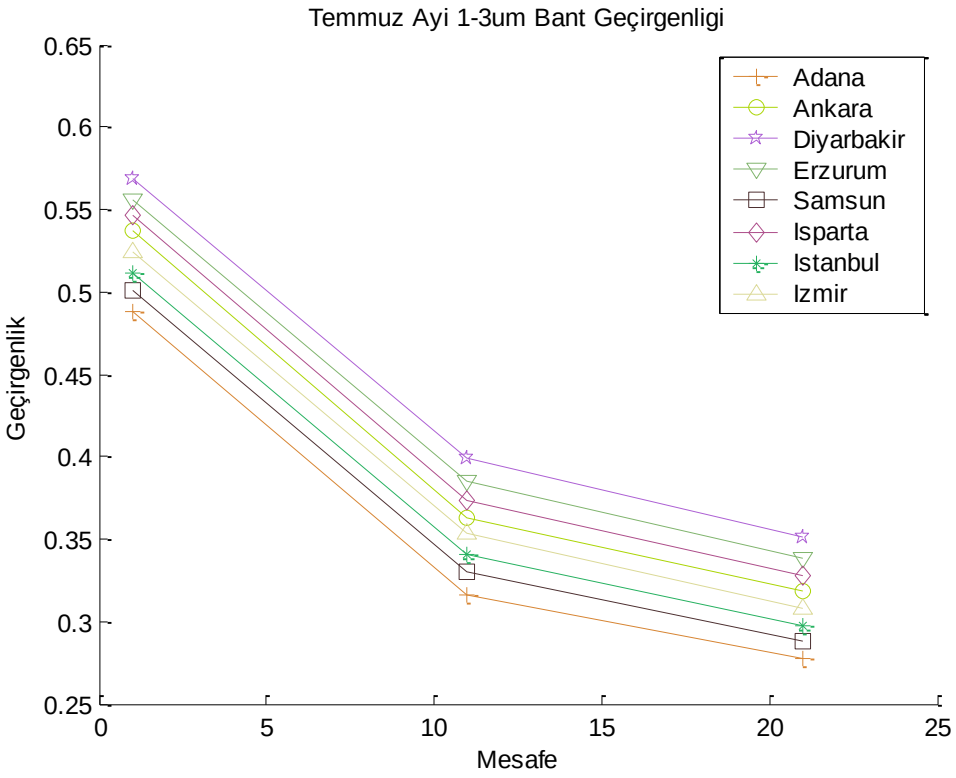
Şekil 5.17 Türkiye atmosfer modeli spektral geçirgenlik grafiği



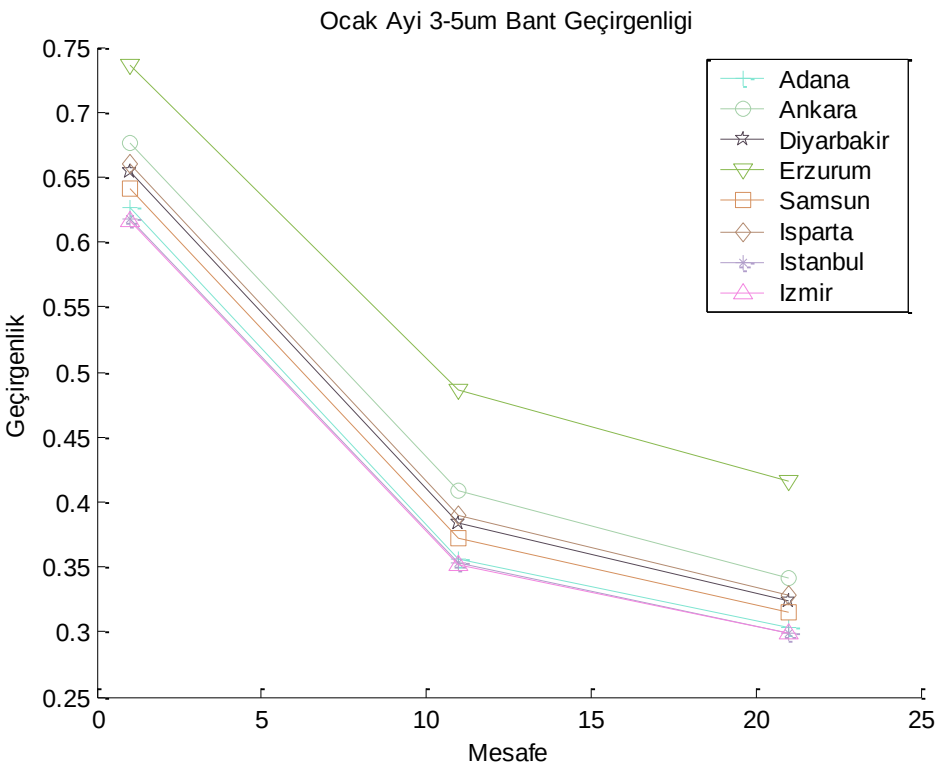
Şekil 5.18 Türkiye atmosfer modeli spektral geçirgenlik grafiği



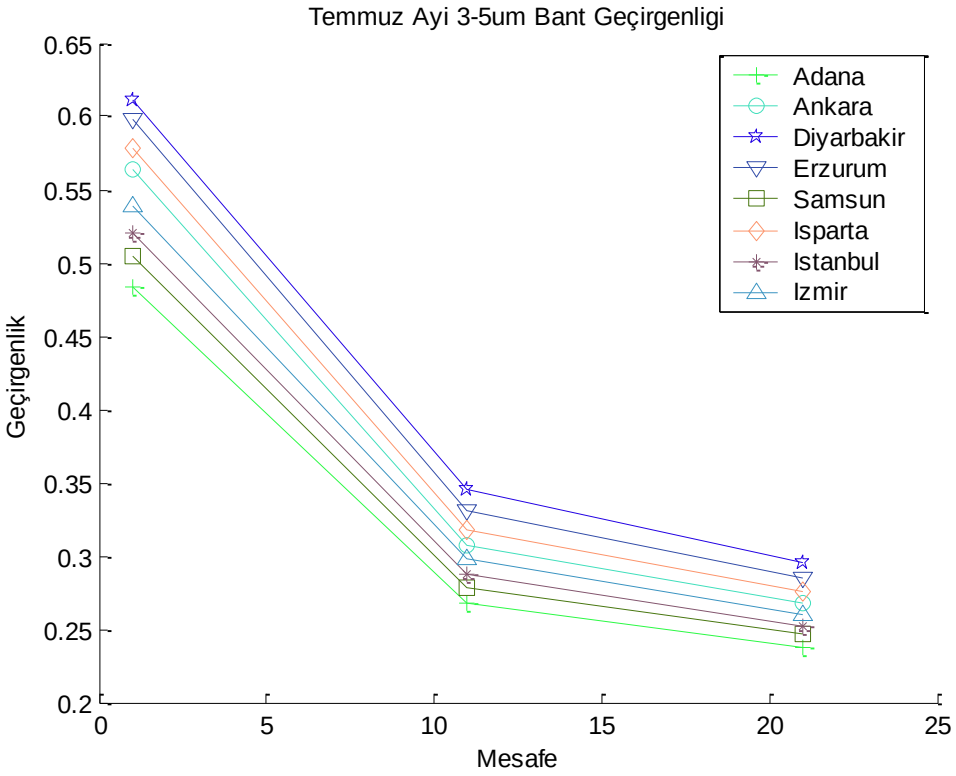
Şekil 5.19 Türkiye atmosfer modeli bant geçirgenlik grafiği



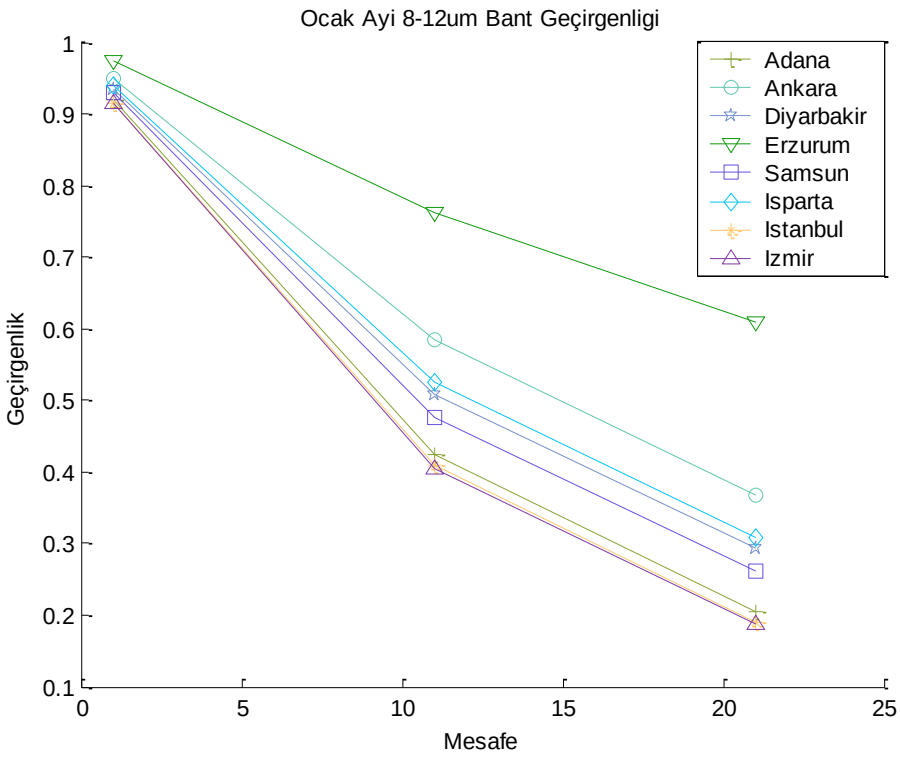
Şekil 5.20 Türkiye atmosfer modeli bant geçirgenlik grafiği



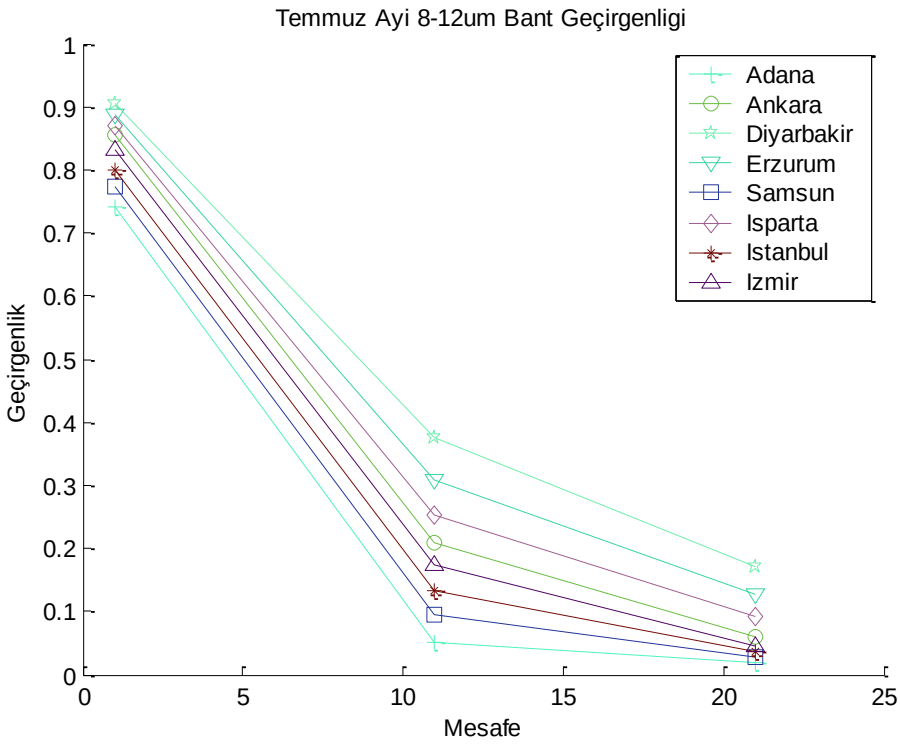
Şekil 5.21 Türkiye atmosfer modeli bant geçirgenlik grafiği



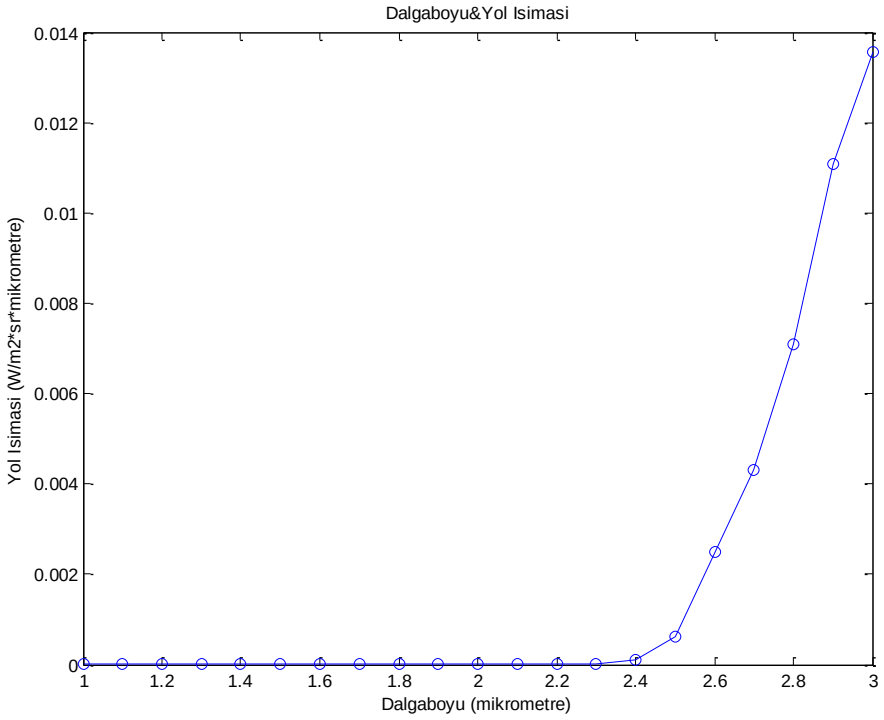
Şekil 5.22 Türkiye atmosfer modeli bant geçirgenlik grafiği



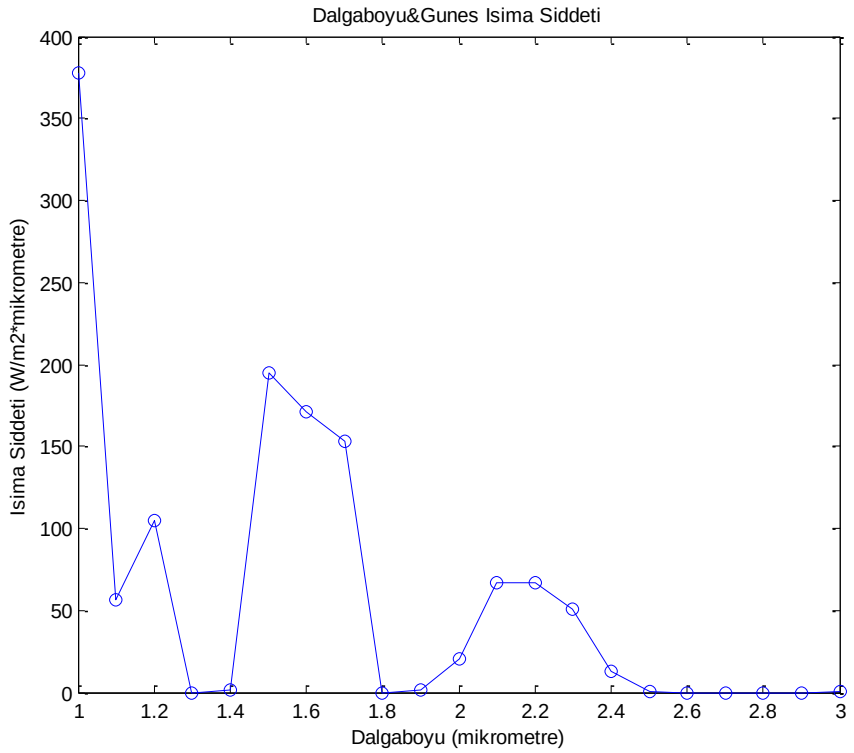
Şekil 5.23 Türkiye atmosfer modeli bant geçirgenlik grafiği



Şekil 5.24 Türkiye atmosfer modeli bant geçirgenlik grafiği



Şekil 5.25 Adana için ocak ayı yol ışıması hesaplaması örneği grafiği



Şekil 5.26 Adana için ocak ayı güneş ışıması hesaplaması örneği grafiği

6. ATMOSFERİK TÜRBÜLANS MODELLEME YAZILIMI (ATMSOFT)

Atmosfer etkileri, kızılötesi/elektro-optik algılama sistemlerinin performanslarında önemli rol oynamaktadır. Bu etkilerden en önemli ve hakim olanlarından birisi ise atmosferik türbülans etkileridir. Bu bölümde atmosferik türbülans etkilerinin hesaplanması ve ATMSOFT yazılımı ile ilgili bilgi verilmektedir. ATMSOFT yazılımı kızılötesi elektro-manyetik spektrumda atmosferik türbülans kaynaklı etkilerin çeşitli modelleme yaklaşımları kullanılarak kestiriminin yapılması ve hesaplanan bu etkilerin kızılötesi kamera kullanılarak alınan imgelere uygulanması işlemlerini gerçekleştiren MATLAB ortamında geliştirilmiş bir yazılımdır. ATMSOFT yazılımını diğer türbülans modelleme yazılımlarından ayıran modelleme algoritmasına ait özellikler ana başlıklar olarak şu şekilde listelenmektedir:

- Yüzeyden iki ya da daha fazla yükseklikten alınan rüzgar hızı, nem ve sıcaklık bilgilerinin kullanılabilmesi
- Benzerlik ölçü sabitlerini Monin-Obukhov Benzerlik (MOS) teorisi kullanarak sınırlı fark yaklaşımı ve bulk-metod tabanlı yaklaşımlar ile kestirimi
- Bulk-metod tabanlı yaklaşımlarda ihtiyaç duyulan yüzey pürüz parametrelerinin eliminasyonu
- Ölçümü yapılan sayısal imge verilerine türbülans etkilerinin doğrudan uygulanabilmesi
- Gerçek zamanlı uygulamalarda kullanılabilir olması

ATMSOFT yazılımda kullanılan temel modelleme yaklaşımları sırasıyla;

- MOS Teorisi mikrometeorolojik parametrelerin kestirimi
- Dikey profil eşitlikleri ikinci dereceden hassas sınırlı fark yaklaşımı kullanılarak çözülmesi
- Bulk Metod tabanlı Cn2 (kırılma indisindeki değişimlerin mesafeye göre modellenmesi) kestirimi
- Atmosferik Türbülans Modülasyon Transfer Fonksiyonu (MTF)

şeklindedir. Bölüm 6.2'de MOS Teorisi, Bölüm 6.2.1'de hassas sınırlı fark yaklaşımı kullanılarak dikey profillerin kestirimi ve yüzey pürüz parametrelerinin eliminasyonu, Bölüm 6.3.1'de Bulk Metod tabanlı Cn2 kestirimi ve Bölüm 6.4.1'de ölçümü yapılan sayısal imge verilerine türbülans etkilerinin doğrudan uygulanabilmesi amaçlı kullanılan Atmosferik Türbülans Modülasyon Transfer Fonksiyonu (MTF) ile ilgili bilgiler anlatılmaktadır. Bu bölümlerin dışındaki bölümlerde ATMSOFT dışındaki modelleme algoritmalarında kullanılan yaklaşımlarla ilgili bilgi verilmektedir. ATMSOFT yazılımının Cn2 kestirim algoritması ve sayısal imge verilerine etkilerin doğrudan uygulanması üzerine geliştirilen algoritmalar ile ilgili detaylı bilgiler tez kapsamında yer almamaktadır. Bu konularla ilgili bilgi için tez sahibi ile iletişime geçilmesi gerekmektedir.

6.1 Atmosferik Türbülans

Türbülans, atmosferde homojen olmayan, zamanla mikrometeorolojik değişimleri tanımlayan bir terim olarak ifade edilmektedir. Bu değişimler, sıcaklık, basınç ve nem değişimleri ile birlikte kırılma indisinde homojen olmayan dağılımlara sebep olmaktadır. Kırılma indisindeki bu değişimler atmosferik türbülans etkilerinin temel nedenidir. Atmosferik türbülans zamanla ışıma şiddetinde dalgalanmalar (kırpışma) gibi birçok etkiye sebep olmaktadır. Yıldızların yanıp sönmesi, lazer ışınının geçişinde ışının açılma ve yönelimi, görüntülemeli uygulamalarda görüntünün oynaması ve bulanıklaşması gibi etkiler bunlara örnek olarak gösterilebilir. Türbülans etkileri kızılötesi elektro-optik algılama sistemlerinin çalıştıkları elektromanyetik spektrum aralığına göre farklılık göstermektedir. Bu etkiler, algılama sistemlerinin, özellikle elektronik harp (EH) gibi kritik alanlarda, farklı tepkiler vermesine sebep olabilmektedir.

6.2 Mikrometeorolojik Kanal Parametre Kestirimi

Mikrometeorolojik kule (tower) ölçümlerinden, benzerlik ölçü sabitlerini (similarity scaling constants) kestirmek mümkündür; bu sabitler, rüzgar hızı, sıcaklık ve özgül nem ölçü sabitleridir ve türbülans modellerinde kullanılır.

Monin-Obukhov Benzerlik Teorisi'nden hareketle (Monin ve Obukhov 1956), rüzgar hızı (U_*), sıcaklık (T_*) ve belirli (spesifik) nem (Q_*) ölçü sabitleri yükseklikten bağımsız olarak

$$\begin{aligned} U_*^2 &= \langle -U'W' \rangle \\ T_* &= -\langle T'W' \rangle / U_* \\ Q_* &= -\langle Q'W' \rangle / U_* \end{aligned} \tag{6.1}$$

şeklinde tanımlanmaktadır (Andreas 1988). Üst tırnaklar anlık türbülans değişimlerini, U ve W ise sırasıyla, enlemesine ve boylamasına rüzgar bileşenlerini ifade etmektedir.

Yüzey sınır tabakasını, tek bir uzunluk ölçü sabiti belirlemektedir. Bu sabit Monin-Obukhov uzunluğu (L) olarak bilinmektedir. Bu fiziksel değil, matematiksel bir uzunluktur ve tabakanın dengesini (stability) belirlemekte kullanılır. Monin-Obukhov uzunluğu

$$L = \theta_{vir} U_*^2 \Big/ \left[kg \; T_* + 0.61 T Q_* \right] \tag{6.2}$$

eşitliği kullanılarak hesaplanmaktadır. Eşitlikte, θ_{vir} virtual potansiyel sıcaklık (θ_{vir}=T(1+0.61Q)), k von Karman sabiti ($\approx$ 0.4) ve g yer çekimi ivmesidir (Andreas 1988).

Mikrometeorolojik kanalı belirleyen diğer sabitler, rüzgar hızı, nem ve sıcaklık için yazılabilir. Bunlar sırasıyla, U*, Q*, T* olarak gösterilebilir. Türbülans kanalının mikrometeorolojik parametreleri, **T** : {L, U*, Q*, T*} olarak yazılabilir. Amaç,

yüzeyden alınan ölçümler ile bu küme içerisindeki parametreleri kestirmek ve türbülans kanalını betimlemektir. Bu denklemler bağımlı bir denklem seti yaratmaktadır. Bu parametreleri kestirmek için iki yöntem önerilebilir; biri direkt yöntem diğeri ise yinelemeli yöntemdir. Direkt yöntem literatürde MARIAH (Rachele vd. 1995) modeli olarak yer almakta, yenilemeli yöntem ise O'KEYPS (Yaglom 1977) modeli olarak yer almaktadır. Tez kapsamında yapılan çalışmalarda, direk yöntem tabanlı bir yaklaşım baz alınarak ikinci dereceden hassas sınırlı fark yaklaşımı dikey profil kanal parametrelerine uygulanmış ve yüzey pürüz parametrelerine olan ihtiyacın ortadan kalkması sağlanmıştır.

6.2.1 Direkt yöntem

Bu yaklaşımda rüzgar hızı, sıcaklık ve nem gradyanlarından (gradient) faydalanılır ve en az iki yüzey meteoroloji verileri ile **T** kümesi kestirilebilir.

Denklemlerin özünü oluşturan yaklaşım (6.3)'de verilmiştir.

$$\begin{aligned} U(z) &= U_0 + (U_*/k)\left[\ln\ z/z_u\ - \psi_m(\zeta)\right] \\ T(z) &= T_0 + (T_*/k)\left[\ln\ z/z_T\ - \psi_h(\zeta)\right] \\ Q(z) &= Q_0 + (Q_*/k)\left[\ln\ z/z_Q\ - \psi_w(\zeta)\right] \end{aligned} \tag{6.3}$$

Bu denklem setinde U_0, T_0 ve Q_0 değerleri U, T ve Q değerlerinin yüzeydeki değerleri olarak, z_U, z_T, z_Q değerleri ise yüzey pürüz parametreleri olarak ve ψ fonksiyonları ise Poulson (1970) tarafından tanımlanmış olan deneysel fonksiyonların integrali alınmış formları olarak kullanılmaktadır. Denklemdeki ζ stabilite parametresi olarak kullanılmaktadır ve z/L olarak tanımlanmıştır. Stabil olmayan durumlar için (ζ <0)

$$\begin{aligned} \psi_m(\zeta) &= 2\ln\left[\ 1+x\ /2\right] + \ln\left[\ 1+x^2\ /2\right] - 2\arctan(x) + \pi/2 \\ \psi_h(\zeta) &= 2\ln\left[\ 1+x^2\ /2\right] \\ \psi_w(\zeta) &= \psi_h(\zeta) \end{aligned} \tag{6.4}$$

fonksiyonları tanımlanmaktadır ve $x=(1-15\xi)^{1/4}$ olarak alınmaktadır (Dyer 1974). Stabil durumlar için ise ($\zeta > 0$) (Webb 1970)

$$\psi_m(\zeta) = \psi_w(\zeta) = \psi_h(\zeta) = -5\zeta \tag{6.5}$$

olarak tanımlanmaktadır.

Denklem 6.3 de yer alan dikey profil eşitlikleri ikinci dereceden hassas sınırlı fark yaklaşımı kullanılarak şu şekilde tanımlanabilmektedir:

$$\partial\varphi(z)/\partial z \cong \varphi(z+\Delta z) - \varphi(z-\Delta z)/2\Delta z; \quad \varphi = U, T, Q \tag{6.6}$$

Bu tanım kullanılarak söz konusu ölçü sabitleri yüzey pürüz parametrelerinden elenmiş olarak

$$\begin{aligned} U_* &= k\ U(z_2) - U(z_1) \left[\ln\ z_2/z_1\ - \psi_m(\zeta_2) + \psi_m(\zeta_1)\right]^{-1} \\ T_* &= k\ T(z_2) - T(z_1) \left[\ln\ z_2/z_1\ - \psi_h(\zeta_2) + \psi_h(\zeta_1)\right]^{-1} \\ Q_* &= k\ Q(z_2) - Q(z_1) \left[\ln\ z_2/z_1\ - \psi_w(\zeta_2) + \psi_w(\zeta_1)\right]^{-1} \end{aligned} \tag{6.7}$$

denklem seti ile ifade edilmektedir. Benzer şekilde L için de bir denklem yazılabilir ve **T** kümesi kestirilmiş olur.

6.2.2 Yinelemeli yöntem

Benzerlik ölçü sabitleri, en az iki kule meteorolojik ölçüm verisi ile elde edilebilir. Denklem setlerini yinelemeli olarak çözmek mümkündür. Döngü sonunda kanal parametreleri kestirimleri elde edilir. Direkt yöntemin avantajı bu döngülere gerek kalmamasıdır. Fakat, döngü sayısı genellikle 3-5 arasında değişmektedir; dolayısı ile yinelemeli yöntemin de yeterince hızlı olduğu değerlendirilmektedir.

Benzerlik teoremine göre, herhangi dinamik yüzey tabaka özeliği, uygun bir ölçü sabiti ile birimsiz hale getirilebilir. Yüzey tabakası içerisindeki ortalama rüzgar hızı, sıcaklık ve nem dikey profilleri benzerlik teoremine göre yazılabilir. Yinelemeli yöntemin temelini oluşturan denklem seti (6.8)' de verilmiştir.

$$
\begin{aligned}
U(z)-U_s &= \frac{U_*}{k}\left[\ln(\frac{z}{z_U})-\Psi_U(zkg\frac{T_*+0.61TQ_*}{\theta_{vir}U_*^2})\right] \\
T(z)-T_s &= \frac{T_*}{k}\left[\ln(\frac{z}{z_T})-\Psi_T(zkg\frac{T_*+0.61TQ_*}{\theta_{vir}U_*^2})\right] \\
Q(z)-Q_s &= \frac{Q_*}{k}\left[\ln(\frac{z}{z_Q})-\Psi_Q(zkg\frac{T_*+0.61TQ_*}{\theta_{vir}U_*^2})\right]
\end{aligned}
\qquad (6.8)
$$

Bu denklem setinde Ψ fonksiyonları birimsiz profil fonksiyonlarının entegre edilmiş halleridir ve Businger-Dyer Formları olarak bilinmektedirler.

Literatürde yüzey pürüz parametrelerinin gözlemsel değerlerini veya formüllerini kullanan yaklaşımlar da mevcuttur. Fakat, bu parametrelerden arındırılmış bir yaklaşımın daha az bilinmeyen içereceği şüphesizdir.

6.3 C_n^2 Yükseklik Profili Kestirimi

C_n^2, kırılma indisi yapısal parametresi, kızılötesi elektro-optik sistem performans analizinde ve tasarımında kullanılan önemli bir parametredir. C_n^2 yükseklik profili, $C_n^2(z)$, bu amaçla elde edilir. Kırıcılık indisi değişimlerinden kaynaklanan sistem bozunumlarını anlamaya yönelik olarak kullanılan bir parametredir.

6.3.1 Bulk (Standart) model

Benzerlik teorisi kullanılarak C_n^2, ortalama atmosferik yüzey özellikleri ile ilişkilendirilebilir. Bu kısımda C_n^2'in anlamı ve hesaplanışı üzerinde durulacaktır.

C_n^2 tanımı (6.9)'de verilmiştir. Bu denklemde **x** ve **x** + **r** uzayda iki noktayı temsil etmektedir. Alt bar işareti zamanda ortalama sembolüdür.

$$\langle\, n(\underline{x}) - n(\underline{x}+\underline{r})\,^2 \rangle = C_n^{\,2} \left\| \underline{r} \right\|^{2/3} \tag{6.9}$$

Herhangi bir dalgaboyundaki, anlık kırılma indisi $\tilde{n}$ genellikle, anlık atmosferik basınç, $\tilde{p}$, anlık sıcaklık, $\tilde{t}$, ve anlık bağıl nem, $\tilde{q}$, ile yazılabilir. Denklem (6.10)'da ilgili eşitlik verilmiştir.

$$\tilde{n} = f(\lambda, \tilde{p}, \tilde{t}, \tilde{q}) \tag{6.10}$$

Bu değişkenlere Reynolds ayırımı yapılarak denklem (6.11) yazılabilir. Burada "ort" alt indisleri ortalamaları, küçük harfler ise sıfır ortalamalı türbülans değişimini göstermektedir.

$$\begin{aligned} \tilde{n} &= N_{ort} + n \\ \tilde{p} &= P_{ort} + p \\ \tilde{t} &= T_{ort} + t \\ \tilde{q} &= Q_{ort} + q \end{aligned} \tag{6.11}$$

Denklem (6.10)'ye Taylor seri açılımı yapılırsa, ortalama koşullarda ve basınçdaki değişimlerin ihmal edilebilir etkisinin olduğu düşünüldüğünde kırılma indisinin (n) anlık türbülans değişimleri için (6.12) denklemi elde edilmektedir (Andreas 1988). Bu denklemde A ve B verilen bir dalgaboyunda ve meteorolojik durumda sabittir. Denklemlerden de görüleceği üzere, kırılma indisindeki türbülans kaynaklı değişimler, nem ve sıcaklıktaki türbülans kaynaklı değişimlere doğrusal olarak bağlıdır.

$$n = A(\lambda, P, T, Q)t + B(\lambda, P, T, Q)q$$
$$A = \frac{\partial f}{\partial \tilde{t}}|_{P,T,Q}, \quad \mathrm{B} = \frac{\partial f}{\partial \tilde{q}}|_{P,T,Q} \tag{6.12}$$

Bu denklemlerdeki A ve B, görünür bant, NIR, MWIR, LWIR için parametrik olarak elde edilebilir.

NIR (0.7 – 1μm) ve SWIR (1 – 3μm) dalgaboyları için, havanın anlık kırılma indisi Owens (1967) tarafından şu şekilde tanımlanmaktadır:

$$n_v = 1 + 10^{-6}\left[m_1(\lambda)\ \ p/t\ + 4.615\ m_2(\lambda) - m_1(\lambda)\ q \right] \tag{6.13}$$

Eşitlikte yer alan p, t ve q sırasıyla hektopaskal cinsinden basınç, kelvin cinsinden sıcaklık ve kg/m^3 cinsinden mutlak nemi ifade etmektedir. $m_1(\lambda)$ ve $m_2(\lambda)$ fonksiyonları ise

$$m_1(\lambda) = 23.7134 + \frac{6839.397}{130 - \lambda^{-2}} + \frac{45.473}{38.9 - \lambda^{-2}}$$
$$m_2(\lambda) = 64.8731 + 0.58058\lambda^{-2} - 0.0071150\lambda^{-4} + 0.0008851\lambda^{-6} \tag{6.14}$$

şeklinde tanımlanmaktadır.

LWIR (8 – 12 μm) dalgaboyları için havanın anlık kırılma indisi Hill ve Lawrence (1986) ve Owens (1967) tarafından

$$n_i = 1 + 10^{-6}\ \ n_{vd} + n_{iw} \tag{6.15}$$

şeklinde elde edilmiştir. Burada n_{vd} ve n_{iw} kuru hava ve su buharı katkıları olarak yer almaktadır ve kuru hava için

$$n_{vd} = \left[m_1(\lambda) \;\; p/t \;\; + 4.615 m_1(\lambda) q \right] \tag{6.16}$$

eşitliği kullanılarak, su buharı için ise -40 ile 40 ^{o}C sıcaklık aralığında

$$n_{iw} = q \left[\frac{957 - 928\theta^{0.4} \;\; \chi - 1}{1.03\theta^{0.17} - 19.8\chi^2 + 8.2\chi^4 - 1.7\chi^8} + \frac{3.747 \times 10^6}{12499 - \chi^2} \right] \tag{6.17}$$

eşitliği kullanılarak hesaplanmaktadırlar. Eşitlikte $\theta = t/273.16^0 K$, ve $\chi = 10\mu m/\lambda$ olarak alınmaktadır.

Bu bilgiler dahilinde A ve B değerleri LWIR dalgaboylarında şu şekilde elde edilmektedir:

$$\begin{aligned} A_i &= A_{vd} + A_{iw} \\ B_i &= B_{vd} + B_{iw} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} A_{vd} &= -10^{-6} m_1(\lambda)\, p/t^2 \\ B_{vd} &= -4.6150 \times 10^{-6} m_1(\lambda) \\ A_{iw} &= 10^{-6} q \left[-1.359\theta^{-0.6} \;\; \chi - 1 \;\; H^{-1} - \left[0.6135\theta^{-0.83} + 0.5949\theta^{-0.43} \;\; \chi - 1 \right] H^{-2} \right] \\ B_{iw} &= 10^{-6} \left[957 - 928\theta^{-0.4} \;\; \chi - 1 \right] H^{-1} + 3.747 / \; 12449 - \chi^2 \end{aligned} \tag{6.18}$$

$H = 1.03\theta^{0.17} - 19.8\chi^2 + 8.2\chi^4 - 1.7\chi^8$ olarak hesaplanmaktadır.

Yapı parametreleri olarak bilinen C_T^2, C_Q^2 ve C_{TQ} parametreleri Wyngaard (1971), Fairall vd. (1980) ve Kohsiek (1982) tarafından ölçü parametreleri cinsinden tanımlanmıştır. Bu tez kapsamında kullanılan yaklaşımla yapı parametreleri, (6.7)'de ifade edilen ölçü parametreleri cinsinden şu şekilde tanımlanmaktadır:

$$\begin{aligned} C_T^2 &= T_*^2 g_T(\zeta) z^{-2/3} \\ C_Q^2 &= Q_*^2 g_Q(\zeta) z^{-2/3} \\ C_{TQ} &= T_* Q_* g_{TQ}(\zeta) z^{-2/3} \end{aligned} \tag{6.19}$$

bu denklemlerde

$$g_T(\zeta) = g_Q(\zeta) = g_{TQ}(\zeta) = \begin{cases} 4.9\ 1-6.1\zeta^{-2/3} & \zeta \le 0 \\ 4.9\ 1+2.2\zeta^{2/3} & \zeta \ge 0 \end{cases} \quad (6.20)$$

olarak yer almaktadır. Bu denklem setindeki g fonksiyonu, benzerlik fonksiyonu olarak tanımlanmaktadır. g_T, g_Q, ve g_{TQ} deneysel olarak belirlenmekte olan birimsiz fonksiyonlardır ve bu genel fonksiyonlara ait çarpanlar ölçümler yapılarak yenilenmektedir (Fairall vd. 1980, Kohsiek 1982, Edson ve Fairall 1998, Andreas vd. 1998).

Buradan hareket ederek, (6.21)'deki denklem setini yazmak mümkündür.

$$C_n^2 = A^2 C_T^2 + 2ABC_{TQ} + B^2 C_Q^2 \quad (6.21)$$

Bu denklemler kullanılarak ilgili kırılma indisi yapısal parametresinin kestirimi yapılmaktadır.

6.3.2 Tatarski modeli

Tatarski (1971) yaklaşımı, standart model ile aynı mantık üzerine kuruludur. Fakat, $\partial n/\partial z$ ifadeleri üzerinden, farklı matematiksel modellemelere dayanır. Kırılma indisi yapısal parametresi için (6.22) yazılabilir.

$$C_n^2(z) = b\frac{K_H}{\varepsilon^{1/3}}\left(\frac{\partial n}{\partial z}\right)^2 \quad (6.22)$$

Bu denklemde b bir sabit, K_H ısı difüzyonu için türbülans değişim katsayısı (turbulant exchange coefficient), ε enerji yitim oranı (energy dissipation rate), $\partial n/\partial z$ kırılma indisinin dikey gradyanını simgelemektedir.

Bu yaklaşımla yola çıkıldığında, denklemler farklı olsa da standart modeller ile yakınsaklık sağlandığı tespit edilmiştir. Bu yaklaşım genelde halihazırda kullanılmakta olan yazılımların birçoğunun temelini içermektedir ve karşılaştırma amacı ile bire bir yazılımı gerçekleştirilerek elde edilmiştir.

6.4 Kırpışma Modeli

Kırılma indisi değişimleri, yoğunluk, sıcaklık, nem gradyanlarından ve basınç değişimlerinden kaynaklanır. Sıcaklık gradyanları; yerin, üzerindeki havadan daha sıcak olduğu, gece veya gündüzün ortasında en büyük değerlerini alır. Gün içindeki bulutlaşma, yüzey ısınmasını sınırlar ve kırılma indisi değişimlerini ciddi ölçüde düşürür. Aksine, gece saatlerinde ortaya çıkan bulutlaşma yerin soğumasını engeller ve kırılma indisi değişimlerini ciddi ölçüde artırır. Rüzgar, hava karışımını (air mixing) sağlar ve sıcaklık gradyanlarını düşürür. Yüzey pürüzlülük uzunlukları (roughness) hava karışımını engeller ve sıcaklık gradyanlarını ve kırılma indisi değişimlerini artırır. Hava ve yer sıcaklıkları eşit olduğunda, ısı transferi gerçekleşmez. Bu geçişler C_n^2'nin en düşük değerler olmasına neden olur; bunlar genellikle güneş doğumundan hemen sonra ve güneş batımından hemen önce gerçekleşir.

Bahsedilen fiziksel süreçleri, kızılötesi/elektro-optik görüntülemeli sistem analizlerine dahil etmek için çeşitli sinyal işleme aşamaları kullanılabilir.

6.4.1 Sinyal işleme

Atmosferdeki fiziksel süreçlerin, kızılötesi/elektro-optik dalgalarına etkilerini modellemek için, atmosfer bir süzgeç olarak modellenebilir. Tüm kırpışma etkileri ortalama olarak bu süzgeçte içerilmektedir. Bu süzgeçten kaynaklanan çarpımsal gürültülerin etkisi sezimci gürültüsünün yanında ihmal edilecek kadar küçüktür.

Sinyal işleme aşamaları için ortalama bir süzgeç yazılabilir ve atmosferik türbülansın sinyal üzerindeki etkileri gösterilmeye çalışılır. ATMSOFT yazılımından kestirimi

yapılan Cn2 değerinin görüntü üzerindeki etkilerini hesaplamak için bu şekilde bir transfer süzgeci tasarlanmış ve kodlanmıştır. Bu tasarım kullanılarak görüntü üzerindeki her bir piksele dönüşüm uygulanarak türbülans ortamı etkilerinin gösterimi sağlanmaktadır. Bu etkiler modellenirken etkilerin nasıl bir sistem üzerinde gözlemleneceği konusunda girdi parametrelerine de ihtiyaç bulunmaktadır. Bu parametreler algılayıcı sistemin optik ve sezimci elemanlarına ait parametreler olup sistemin hedef ile arasındaki mesafesi de hesaplamalarda ihtiyaç duyulan bir başka önemli parametredir. Türbülans etkisini modelleyen kapalı yapı (closed form) doğrusal transformasyon (6.23)'de verilmiştir. Bu model Fried (1965, 1966) tarafından tanımlanan atmosferik türbülans modülasyon transfer fonksiyonu (MTF) olarak bilinmektedir.

$$H(u) \approx \exp\left[-3.44 \left(\frac{\lambda f_{optics}}{0.185\left(\frac{8\lambda^2}{3RC_n^2} \right)^{3/5}} u_{fp} \right)^{5/3} \left[1 - \alpha \left(\frac{\lambda f_{optics}}{D} u_{fp} \right)^{1/3} \right] \right] \qquad (6.23)$$

Denklem (6.4.1.1)'de D açıklık çapını, u_{fp} odak düzlem uzamsal frekansını ve f_{optics} optik sistemin odak uzunluğunu göstermektedir. α parametresi ise kısıtlayan durumlara göre 0, 0.5 veya 1 değerlerini almaktadır. Kısa pozlama $t << 10$ ms içindeki gözlemler olarak değerlendirilebilir. Genellikle görüntülemeli sistemler kısa pozlama durumunda çalışırlar. Fakat, göz entegre zamanı nedeni ile, bir insan uzun pozlama durumunu algılar. Lazer darbe süreçleri genellikle 10 μs' dan daha düşüktür ve lazer alıcıları genellikle kısa pozlama modundan çalışırlar. Uzak alan ve yakın alan durumları, α sabitini etkileyen diğer faktörlerdir. $R<<D^2/\lambda$ yakın alan, $R>>D^2/\lambda$ uzak alan durumunu ifade eder.

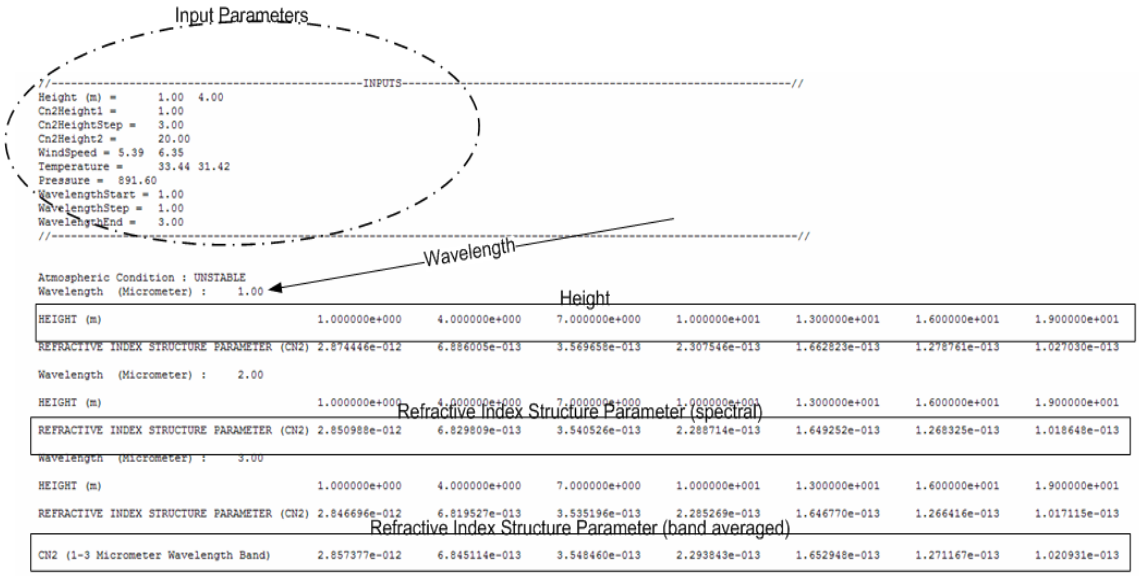
7. ATMSOFT YAZILIMI ARAYÜZ TANIMLAMALARI

Yazılımı iki bölüm şeklinde tanımlamak mümkündür. Birinci bölüm tez kapsamında anlatılan metodoloji kullanılarak Cn2 kestirimlerinin yapılması, diğeri ise bu kestirimler sonucu elde edilen Cn2 değerlerinin kullanılarak imgeler üzerindeki sintilasyon etkilerinin modellenmesi ve gösterimi olarak tanımlanmaktadır. ATMSOFT yazılımı girdi parametreleri ve kısıtlamaları çizelge 7.1'de gösterilmektedir.

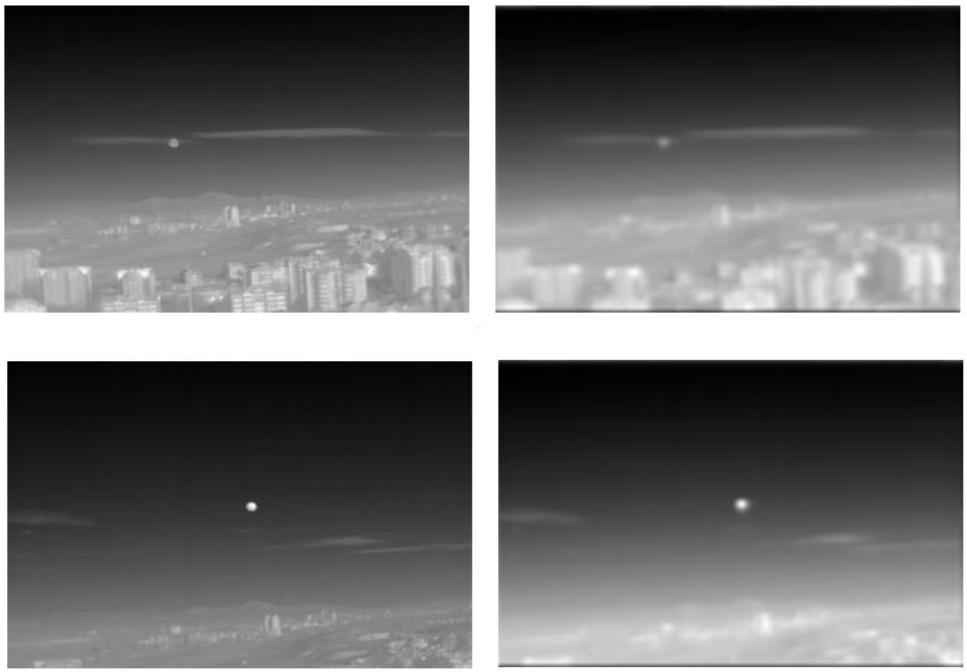
Çizelge 7.1 ATMSOFT yazılımı girdi parametreleri ve kısıtlamalar

Girdi Parametreleri	**Tanımlar**	**Kısıtlar**
Z (Z1,Z2,..,Zn)	Yer seviyesi üzerindeki yükseklik	0<Z1<Z2<...<Zn≤20m 0<Z2-Z1≤10m
WS (WS1,WS2,...,WSn)	Yer seviyesi üzerindeki rüzgar hızı	0≤WS≤18m/s
T (T1,T2,..,Tn)	Yer seviyesi üzerindeki sıcaklık	$-40^oC \leq T \leq 40^oC$
RH (RH1,RH2,..,RHn)	Yer seviyesi üzerindeki bağıl nem	0%≤RH≤100%
PR (PR1,PR2,..,PRn)	Yer seviyesi üzerindeki basınç	700mbar≤PR≤1060mbar
WLSTART	Dalgaboyu başlangıç	0.36μm≤WLSTART≤WLEND≤3.0 μm 7.8μm≤WLSTART≤WLEND≤19.0 μm
WLEND	Dalgaboyu bitiş	Yukarıda yer almaktadır.
WLSTEP	Dalgaboyu çözünürlüğü	0μm<WLSTEP
METHOD	Metodoloji	MARIAH, OKEYPS
CN2ZSTART	CN2 profili asgari yüksekliği	CN2ZSTART≤0m
CN2ZEND	CN2 profili azami yüksekliği	CN2ZSTART≤ CN2ZEND
CN2ZSTEP	CN2 yükseklik profili çözünürlüğü	0m<CN2ZSTEP
SE	Sintilasyon etkileri	seçili, seçili değil
FL	Optik sistem odak uzunluğu	0m< FL
AD	Sistem açıklık çapı	0m< AD
TH	Hedef Yüksekliği	0m< TH
SH	Sensör yüksekliği	0m< SH
EXTP	Pozlama tipi	LONG, SHORT
PSES	Projeksiyon edilen sahne yükseklik boyutu	0m< PSES
SS	Sahne boyutu	0m< SS
IRSFN	IR iz dosyası adı	

ATMSOFT yazılımının örnek bir çıktı formatı ve LWIR dalgaboyu bandında sabah ve akşama doğru çekilmiş iki imge üzerinde Cn2 üzerinden modellenen sintilasyon etkilerinin gösterildiği örnek bir çalışma sırasıyla şekil 7.1 ve şekil 7.2'de yer almaktadır. Yer yüzeyine yakın atmosferik yüzey katmanlarında Cn2 değerleri genellikle 10^{-12} ile 10^{-16} $m^{-2/3}$ değerleri arasındadır (Tunick 2003). Düşük Cn2 değerleri, 10^{-16} - 10^{-15}, ihmal edilebilir derecede düşük türbülans durumunu; yüksek Cn2 değerleri 10^{-12} - 10^{-14} $m^{-2/3}$ yüksek türbülans durumunu ifade etmektedir.



Şekil 7.1 ATMSOFT Cn2 modeli örnek çıktı formatı



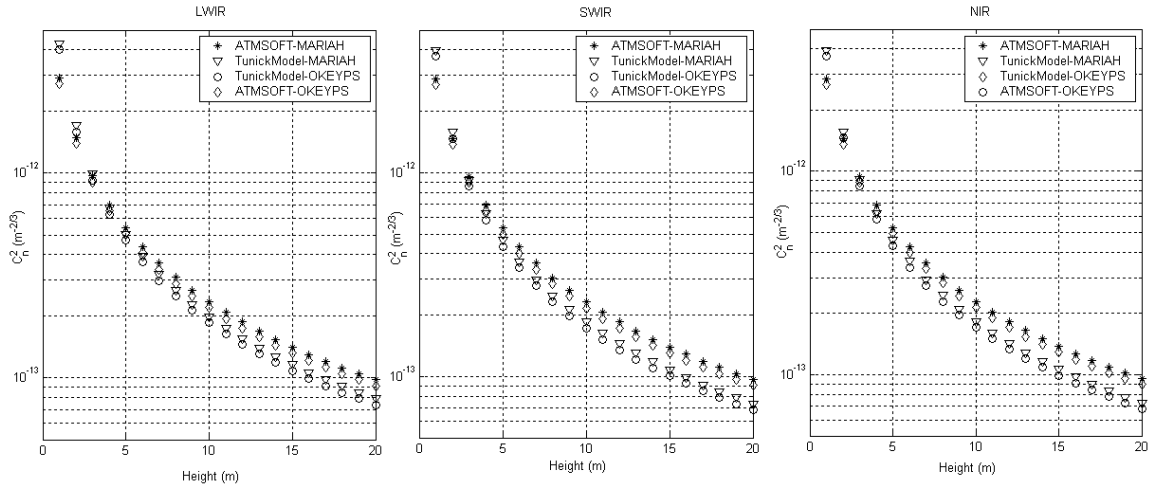
(a) (b)

Şekil 7.2 FLIR A40 kamerası kullanılarak alınmış ölçümler üzerine örnek Cn2 verileri kullanılarak modellenen sintilasyon etkileri

a. Orijinal ölçüm ve b. atmosferik türbülans etkileri 10^{-12} $m^{-2/3}$ > Cn2 > 10^{-14} $m^{-2/3}$ olacak şekilde modellenmiş veri

8. ATMSOFT YAZILIMI DOĞRULAMA ÇALIŞMALARI

Doğrulama çalışmaları Tunick (2003) modelleme yaklaşımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Doğrulama çalışmaları kapsamında MARIAH ve OKEYPS metodolojilerinin Cn2 üzerine etkileri de ayrıca incelenmiştir. Kullanılan girdi parametreleri 9 Temmuz 1992'de Army Research Laboratory (ARL), Agricultural Research Service (ARS) ve Conservation and Production Research Laboratory (CPRL) tarafından Bushland, TX'da yapılan ölçüm çalışmalarından alınmıştır (Tunick vd. 1994). SWIR, NIR ve LWIR dalgaboyu bantları için elde edilen Cn2 yükseklik profilleri şekil 8.1'de yer almaktadır (Sivaslıgil vd. 2013). Sonuç grafikleri incelendiğinde LWIR dalgaboyu bandında SWIR ve NIR dalgaboyu bantlarına göre daha yüksek Cn2 değerleri hesaplandığı görülmektedir. Bu durum beklenen bir sonuç olup, kırılma indisindeki türbülans dalgalanma bileşenlerinden kaynaklanmaktadır (Andreas 1988).



Şekil 8.1 ATMSOFT (yıldız ve elmas işaretleri) ve Tunick (aşağı doğru üçgen ve çember işaretleri) modelleri için MARIAH ve OKEYPS metodolojileri kullanılarak elde edilen Cn2 kestirim sonuçları

Bantların tümünde yüzeyden 5 m yükseklikten sonra C_n^2 değerlerinde sert bir düşüş gözlenmektedir ve ATMSOFT ve Tunick model farklılıkları 20 m yüksekliğe kadar neredeyse sabittir. Genel olarak karşılaştırma sonucunda ATMSOFT çıktılarının Tunick model çıktılarıyla uyumlu oldukları ve çok yakın sonuçlar verdikleri görülmektedir.

Diğer taraftan ATMSOFT yazılımı sonuçlarındaki doğruluk hassasiyeti MOS Teorisi'nin geçerli olmadığı koşullarda düşmektedir. Bu koşullar durağan olmayan ve yatayda homojen olmayan atmosferik koşullar olarak belirtilebilmektedir. Genellikle gece koşullarında bu duruma rastlanmaktadır. Benzer sonuçlar diğer C_n^2 kestirim modelleri için de raporlanmıştır (Frederickson vd. 2000, Tunick 2003, Bendersky vd. 2004). Sonuçlardan elde edilen bir diğer bilgi de MARIAH ve OKEYPS metodolojilerinin her ne kadar girdi parametreleri olarak farklı parametreler kullansalar da, çıktılarının denk sonuçlar verdiklerinin görülmesi olarak ifade edilebilir. Bu durumda iki metodolojiden herhangi birinin ihtiyaç duyulan girdi parametreleri (Dyer 1974, Tunick vd. 1994) göz önünde bulundurularak kullanılabileceği sonucu ortaya çıkmaktadır (Sivaslıgil vd. 2013).

9. SONUÇ

Kızılötesi atmosferik etkilerin modellenmesi amacıyla geliştirilen KAAN ve ATMSOFT yazılımları, yazılımların doğrulama çalışmaları, KAAN yazılımı kullanılarak milli atmosfer modellerinin ortaya çıkarılması çalışmaları ve elde edilen sonuçlarla birlikte bu tez kapsamında sunulmuştur. Her iki yazılım için yapılan doğrulama çalışmaları sonucunda elde edilen veriler, yazılımların genel anlamda kabul edilebilir sınırlarda ve doğrulama çalışmalarında kullanılan ölçüm verileriyle yakın ve uyumlu sonuçlar verdiği görülmüştür.

Literatürde de yer alan ölçüm çalışmaları ile elde edilen mikrometeorolojik kule parametreleri ATMSOFT yazılımında girdi parametreleri olarak kullanılarak C_n^2, kırılma indisi yapısal parametresi, kestirimleri yapılış ve sonuç olarak yapılan kestirimin saha ölçümleri ile doğrulaması yapılmış Tunick modeli çıktılarıyla uyumlu olduğu görülmüştür. Aynı zamanda bu çalışmaya ek olarak MARIAH ve OKEYPS metodolojilerinin C_n^2 üzerine etkileri de incelenmiş ve çıktılarının denk sonuçlar verdiği bilgisi elde edilmiştir.

Farklı açık saha ölçümlerinden elde edilen atmosferik geçirgenlik verileri ile KAAN yazılımı kullanılarak bahse konu açık saha atmosferik koşullarında yapılan hesaplamalar vasıtasıyla elde edilen geçirgenlik verileri incelenmiş ve sonuç olarak yakın ve karakteristik açıdan uyumlu sonuçlar elde edilmiştir. Ayrıca, bu çalışmaya ek olarak doğrulama çalışmaları literatürde çeşitli çalışmalarda yer alan ve bu alanda kullanımı dünya çapında kabul görmüş olan MODTRAN yazılımı ile açık saha ölçümleri üzerinden karşılaştırmalar yapılmıştır. Bu karşılaştırmalar sonucunda her iki yazılımında atmosferik modelleme kapsamında kabul edilebilir limitlerde olduğu ve ihtiyaçlar göz önünde bulundurularak kullanıcı tarafından tercih yapılabileceği değerlendirilmektedir.

Türkiye kızılötesi atmosferik modellerin elde edilmesi kapsamında KAAN yazılımı kullanılarak yapılan çalışmalarda elde edilen sonuçları genel olarak şu şekilde listelemek mümkündür:

- Atmosferik geçirgenliklerde en yüksek değerler büyük ölçüde Erzurum verilerinde en düşük veriler ise deniz seviyesindeki illerde elde edilmiştir,

- Temmuz ayı Diyarbakır atmosferik geçirgenlik değerlerinin Erzurum atmosferik geçirgenlik değerlerinden üç dalgaboyu bandında küçük bir farkla da olsa daha büyük olduğu elde edilmiştir,

- Atmosferik geçirgenlik yaz aylarında kış aylarına oranla daha düşük olarak elde edilmiştir,

- LWIR dalgaboyu bandında geçirgenlik değerleri diğer iki dalgaboyu bantlarına oranla daha yüksek olarak elde edilmiştir,

- CO_2 ve H_2O soğurucuları SWIR ve MWIR bantlarında yer alan belirli dalgaboylarında kısa mesafelerde dahil olmak üzere geçirgenliği çok düşük değerlere çekebilmektedir.

- LWIR dalgaboyu bandındaki geçirgenlik değerlerinin mesafenin artmasıyla çok daha hızlı bir şekilde düştüğü elde edilmiştir.

Listelenen sonuçların tümü beklenen sonuçlar olarak değerlendirilmektedir. Bu sonuçların elde edilmesindeki ana etken illerin atmosfer katmalarında yer alan su buharı molekülleri olarak gösterilebilir. Bu moleküllerin miktarları mesafeye bağlı olarak molekül yoğunluklarının hesaplaması ile elde edilerek modellerde kullanılmaktadır.

KAAN ve ATMSOFT yazılımlarının, özellikle elektronik harp alanında, kızılötesi elektro-optik sistemlerin performanslarının modellenmesinde ve tasarımlarında, gerçek zamanlı simülasyonlarda ve atmosferik etkilerin analizlerinde etkin olarak kullanılabileceği değerlendirilmektedir. Ayrıca, yazılımların milli yazılımlar olması ve ilgili atmosferik etkilerin modellenmesi konusundaki ilk milli yazılımlar olması açısında da çok büyük bir öneme sahip oldukları değerlendirilmektedir.

KAYNAKLAR

Abreu, L. W. and Anderson, G. P. 1996. The MODTRAN 2/3 report and LOWTRAN 7 model. Air Force Phillips Lab., Geophys. Dir., Hanscom Air Force Base.

Andreas, E. L. 1988. Estimating Cn2 over snow and sea ice from meteorological data. J. Opt. Soc. Am. 5, 481–495.

Andreas, E. L., Hill, R. J., Gosz, J. R., Moore, D. I., Otto, W. D. and Sarma, A. D. 1998. Statistics of surface-layer turbulence over terrain with meter-scale heterogeneity. Bound.-Layer Meteor. 86, 379–408.

Bendersky, S., Kopeika, N.S. and Blaunstein, N. 2004. Atmospheric optical turbulence over land in middle east coastal environments: prediction modeling and measurements. Appl Optics 43:4070–4079.

Ben-Shalom, A., Cabib, D., Devir, A. D., Goldschmidt, D., Lipson, S. G. and Oppenheim, U. P. 1980. Spectral Characteristics of Infrared Transmittance of the Atmosphere in the Region 2.8-14 μm- Preliminary Measurements. Infrared Physics, Vol. 20, pp. 165-174.

Biberman, L. M. 2000. Electro-Optical Imaging : System Performance and Imaging. SPIE, Washington, USA.

Caniou, J. 1999. Passive Infrared Detection Theory and Applications. Kluwer Academic Publishers, Boston.

Devir, A. 2002. Comparison of Atmospheric Transmittance Measurements in the 0.4-0.7 μm,1.3-5.5 μm and 8-12 μm Spectral Regions with MODTRAN: Considerations for long path geometries applicable for Theatre Defense. IARD - Institute for Advanced Research & Development.

Driggers, R. G., Cox, P. and Edwards, T. 1999. Introduction to Infrared and Electro-Optical Systems. Artech House, Boston,USA.

Dyer, A. J. 1974. A review of flux–profile relationships. Boundary-Layer Meteorol. 7, 363–372.

Fairall, C. W., Schacher, G. E. and Davidson, K. L. 1980. Measurements of the humidity structure function parameters, Cq2 and CTq, over the ocean. Bound.-Layer Meteor. 19, 81–92.

Frederickson, P. A., Davidson, K. L., Zeisse, C. R. and Bendall, C. S. 2000. Estimating the refractive index structure parameter (Cn2) over the ocean using bulk methods. J. Appl. Meteorol. 39, 1770–1783.

Fried, D. L. 1965. Statistics of a Geometric Representation of Wavefront Distortion. J. Opt. Soc. Am. 55, 1427-1431.

Fried, D. L. 1966. Optical Resolution Through a Randomly Inhomogeneous Medium for Very Long and Very Short Exposures. J. Opt. Soc. Am. 56, 1372-1379.

Hill, R. J., Lawrence and R. S. 1986. Refractive index of water vapor in infrared windows. Infrared Phys. 26, 371–376.

Hudson, R. D. 1969. Infrared System Engineering. John Wiley & Sons, inc., USA.

Kohsiek, W. 1982. Measuring CT2, Cq2 and CTQ in the unstable surface layer, and relations to the vertical fluxes of heat and moisture. Bound.-Layer Meteor. 24, 89–107.

Monin, A. S. and Obukhov, A. M. 1954. Basic regularity in turbulent mixing in the surface layer of the atmosphere. Trans. Geophys. Inst. (Trudy) Acad. Sci. USSR 24, 163–187.

Owens, C. J. 1967. Optical refractive index of air; dependence on pressure temperature and composition. Appl. Optics 6, 51–59.

Paulson, C. A. 1970. The mathematical representation of wind speed and temperature profiles in the unstable atmospheric surface layer. J. Appl. Meteor. 9, 857–861.

Rachele, H., Tunick, A. and Hansen, F. V. 1995. MARIAH-A similarity based method for determining wind, temperature and humidity profile structure in the atmospheric surface layer. J. Appl. Meteorol. 34, 1000–1005.

Shaw, J. A. 1999. Modeling Infrared Lunar Radiance. Opt. Eng. 38(10), 1763-1764.

Sivaslıgil, M. and Erol, C. B. 2008. Software for the Fast CalculatIon of AtmospherIc Infrared Effects. ITBM&S, Etlingen.

Sivaslıgil, M., Erol, C. B. and Esendemir, A. 2009. Infrared Atmospheric Background Modeling: A Fast Model for Computing Infrared Atmospheric Background Effects. LAP, p.53.

Sivaslıgil, M., Erol, C. B., Polat, Ö. M. and Sarı, H. 2013. Validation of refractive index structure parameter estimation for certain infrared bands. App. Opt., 52(13), pp. 3127-3133.

Tatarski, V. I. 1971. *The Effects of the Turbulent Atmosphere on Wave Propagation* (Israel Program for Scientific Translations).

Taylor, J. H. and Yates, H. W. 1957. Atmospheric Transmission in the Infrared. J. Opt. Soc. Am. 47, pp. 223-226.

Tunick, A. 2003. CN2 model to calculate the micrometeorological influences on the refractive index structure parameter. Env. Mod. & Soft. 18, 165–171.

Tunick, A., Rachele, H., Hansen, F. V., Howell, T. A., Steiner, J. L., Schneider, A. D. and Evett, S. R. 1994. REBAL'92-A cooperative radiation and energy balance field study for imagery and EM propagation. Bull. Amer. Meteor. Soc. 75, 421–430.

Webb, W. K. 1970. Profile relationships: the log–linear range and extension to strong stability. Q. J. R. Meteorol. Soc. 96, 67–90.

Wyngaard, J. C., Izumi, Y. and Collins, S. A. 1971. Behavior of the refractive-index-structure parameter near the ground. J. Opt. Soc. Am. 61, 1646–1650.

Yaglom, A. M. 1977. Comments on wind and temperature flux-profile relationships. Boundary-Layer Meteorol. 11, 89–102.

EK-1 CO2 ve H2O geçirgenlik tablosu

1. CO2 geçirgenlik tablosu

DalgaBoyu (µm)	Yol Uzunluğu (km)									
	0.2	**0.5**	**1**	**2**	**5**	**10**	**20**	**50**	**100**	**200**
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1.1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1.2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1.3	1	1	0.999	0.999	0.999	0.998	0.997	0.996	0.994	0.992
1.4	0.995	0.992	0.988	0.984	0.975	0.964	0.949	0.919	0.885	0.838
1.5	0.999	0.998	0.998	0.997	0.995	0.993	0.99	0.984	0.976	0.967
1.6	0.995	0.992	0.988	0.984	0.975	0.964	0.949	0.919	0.885	0.838
1.7	1	1	0.999	0.999	0.999	0.998	0.997	0.996	0.994	0.992
1.8	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1.9	1	1	0.999	0.999	0.999	0.998	0.997	0.996	0.994	0.992
2	0.969	0.951	0.931	0.903	0.847	0.785	0.699	0.541	0.387	0.221
2.1	0.997	0.996	0.994	0.992	0.987	0.982	0.974	0.959	0.942	0.919

DalgaBoyu (µm)	Yol Uzunluğu (km)									
	0.2	**0.5**	**1**	**2**	**5**	**10**	**20**	**50**	**100**	**200**
2.2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2.3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2.4	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2.5	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2.6	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2.7	0.718	0.569	0.419	0.253	0.071	0.011	0	0	0	0
2.8	0.804	0.695	0.578	0.432	0.215	0.079	0.013	0	0	0
2.9	0.995	0.993	0.99	0.985	0.977	0.968	0.954	0.927	0.898	0.855
3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
3.1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
3.2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
3.3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
3.4	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
3.5	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
3.6	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

DalgaBoyu (µm)	Yol Uzunluğu (km)									
	0.2	**0.5**	**1**	**2**	**5**	**10**	**20**	**50**	**100**	**200**
3.7	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
3.8	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
3.9	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
4	0.997	0.996	0.994	0.991	0.986	0.98	0.971	0.955	0.937	0.911
4.1	0.975	0.961	0.944	0.921	0.876	0.825	0.755	0.622	0.485	0.322
4.2	0.551	0.445	0.182	0.059	0.003	0	0	0	0	0
4.3	0.016	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4.4	0.319	0.115	0.026	0.002	0	0	0	0	0	0
4.5	0.949	0.903	0.863	0.807	0.699	0.585	0.439	0.222	0.084	0.014
4.6	0.993	0.989	0.985	0.978	0.966	0.951	0.931	0.891	0.845	0.783
4.7	0.993	0.989	0.985	0.978	0.966	0.951	0.931	0.891	0.845	0.783
4.8	0.966	0.945	0.922	0.891	0.828	0.759	0.664	0.492	0.331	0.169
4.9	0.964	0.943	0.92	0.886	0.822	0.75	0.652	0.468	0.313	0.153
5	0.998	0.997	0.995	0.994	0.99	0.986	0.979	0.968	0.954	0.935
5.1	0.999	0.999	0.998	0.998	0.996	0.994	0.992	0.988	0.984	0.976

DalgaBoyu (µm)	Yol Uzunluğu (km)									
	0.2	**0.5**	**1**	**2**	**5**	**10**	**20**	**50**	**100**	**200**
5.2	0.98	0.968	0.955	0.936	0.899	0.857	0.799	0.687	0.569	0.42
5.3	0.995	0.993	0.989	0.984	0.976	0.966	0.951	0.923	0.891	0.846
5.4	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
5.5	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
5.6	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
5.7	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
5.8	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
5.9	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
6	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
6.1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
6.2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
6.3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
6.4	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
6.5	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
6.6	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

DalgaBoyu (µm)	Yol Uzunluğu (km)									
	0.2	**0.5**	**1**	**2**	**5**	**10**	**20**	**50**	**100**	**200**
6.7	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
6.8	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
6.9	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
7	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
7.1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
7.2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
7.3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
7.4	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
7.5	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
7.6	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
7.7	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
7.8	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
7.9	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
8	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
8.1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

DalgaBoyu (µm)	Yol Uzunluğu (km)									
	0.2	**0.5**	**1**	**2**	**5**	**10**	**20**	**50**	**100**	**200**
8.2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
8.3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
8.4	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
8.5	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
8.6	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
8.7	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
8.8	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
8.9	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
9	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
9.1	1	1	0.999	0.999	0.998	0.995	0.991	0.978	0.955	0.914
9.2	1	1	0.999	0.998	0.995	0.991	0.982	0.955	0.913	0.834
9.3	0.999	0.997	0.995	0.99	0.975	0.951	0.904	0.776	0.605	0.363
9.4	0.993	0.982	0.965	0.931	0.837	0.7	0.491	0.168	0.028	0.001
9.5	0.993	0.983	0.967	0.935	0.842	0.715	0.512	0.187	0.035	0.001
9.6	0.996	0.99	0.98	0.961	0.906	0.821	0.675	0.363	0.14	0.029

DalgaBoyu (µm)	Yol Uzunluğu (km)									
	0.2	**0.5**	**1**	**2**	**5**	**10**	**20**	**50**	**100**	**200**
9.7	0.995	0.986	0.973	0.947	0.873	0.761	0.58	0.256	0.065	0.004
9.8	0.997	0.992	0.984	0.969	0.924	0.858	0.73	0.455	0.206	0.043
9.9	0.998	0.995	0.989	0.979	0.948	0.897	0.811	0.585	0.342	0.123
10	1	1	0.999	0.997	0.994	0.989	0.978	0.945	0.892	0.797
10.1	1	0.999	0.998	0.996	0.99	0.98	0.96	0.902	0.814	0.663
10.2	0.997	0.994	0.988	0.977	0.943	0.89	0.792	0.558	0.312	0.097
10.3	0.997	0.994	0.987	0.975	0.939	0.881	0.777	0.532	0.283	0.08
10.4	1	1	0.999	0.998	0.995	0.991	0.982	0.955	0.913	0.834
10.5	1	1	0.999	0.998	0.998	0.995	0.991	0.978	0.955	0.914
10.6	1	1	0.999	0.999	0.998	0.995	0.991	0.978	0.955	0.914
10.7	1	1	1	0.999	0.999	0.997	0.995	0.986	0.973	0.947
10.8	1	1	0.999	0.998	0.998	0.995	0.991	0.978	0.955	0.914
10.9	1	0.999	0.999	0.997	0.993	0.986	0.973	0.934	0.872	0.761
11	1	0.999	0.999	0.997	0.993	0.986	0.973	0.934	0.872	0.761
11.1	1	0.999	0.998	0.997	0.992	0.984	0.969	0.923	0.855	0.726

DalgaBoyu (µm)	Yol Uzunluğu (km)									
	0.2	**0.5**	**1**	**2**	**5**	**10**	**20**	**50**	**100**	**200**
11.2	1	0.999	0.998	0.995	0.989	0.978	0.955	0.892	0.796	0.633
11.3	0.999	0.999	0.997	0.994	0.985	0.971	0.942	0.862	0.742	0.552
11.4	0.999	0.998	0.997	0.993	0.983	0.966	0.934	0.842	0.709	0.503
11.5	0.999	0.998	0.996	0.992	0.98	0.96	0.921	0.814	0.661	0.438
11.6	0.999	0.998	0.995	0.991	0.977	0.955	0.912	0.794	0.632	0.399
11.7	0.999	0.998	0.995	0.991	0.977	0.955	0.912	0.794	0.632	0.399
11.8	0.999	0.998	0.997	0.993	0.983	0.966	0.934	0.842	0.709	0.503
11.9	1	0.999	0.998	0.995	0.989	0.978	0.955	0.892	0.796	0.633
12	1	1	0.999	0.999	0.997	0.993	0.986	0.966	0.934	0.872
12.1	1	1	0.999	0.998	0.998	0.995	0.991	0.978	0.955	0.914
12.2	1	1	0.999	0.998	0.998	0.995	0.991	0.978	0.955	0.914
12.3	0.998	0.995	0.99	0.981	0.952	0.907	0.823	0.614	0.376	0.142
12.4	0.994	0.985	0.97	0.941	0.859	0.738	0.545	0.218	0.048	0.002
12.5	0.987	0.968	0.936	0.877	0.719	0.517	0.268	0.037	0.001	0
12.6	0.98	0.95	0.903	0.815	0.599	0.358	0.129	0.006	0	0

DalgaBoyu (µm)	Yol Uzunluğu (km)									
	0.2	**0.5**	**1**	**2**	**5**	**10**	**20**	**50**	**100**	**200**
12.7	0.996	0.989	0.979	0.959	0.899	0.809	0.654	0.346	0.12	0.015
12.8	0.99	0.974	0.949	0.901	0.77	0.592	0.351	0.072	0.005	0
12.9	0.985	0.962	0.925	0.856	0.677	0.458	0.21	0.02	0	0
13	0.991	0.977	0.955	0.912	0.794	0.63	0.397	0.099	0.01	0
13.1	0.99	0.974	0.949	0.9	0.768	0.592	0.348	0.071	0.005	0
13.2	0.978	0.946	0.895	0.801	0.575	0.33	0.109	0.004	0	0
13.3	0.952	0.884	0.782	0.611	0.292	0.085	0.007	0	0	0
13.4	0.935	0.846	0.715	0.512	0.187	0.035	0.001	0	0	0
13.5	0.901	0.767	0.593	0.352	0.07	0.005	0	0	0	0
13.6	0.901	0.792	0.627	0.351	0.097	0.009	0	0	0	0
13.7	0.916	0.803	0.644	0.415	0.11	0.012	0	0	0	0
13.8	0.858	0.681	0.464	0.215	0.021	0	0	0	0	0
13.9	0.778	0.534	0.286	0.082	0.002	0	0	0	0	0

2. H_2O geçirgenlik tablosu

DalgaBoyu (µm)	Yol Uzunluğu (km)									
	0.2	**0.5**	**1**	**2**	**5**	**10**	**20**	**50**	**100**	**200**
1	1	0.9999	0.9998	0.9996	0.999	0.998	0.996	0.99	0.9801	0.9606
1.1	0.9927	0.9817	0.9638	0.9292	0.8358	0.7082	0.5264	0.2616	0.1127	0.0323
1.2	0.997	0.996	0.994	0.991	0.986	0.98	0.972	0.956	0.937	0.911
1.3	0.9663	0.9224	0.8631	0.778	0.6376	0.5196	0.3954	0.2278	0.1124	0.0342
1.4	0.0247	0.0008	0	0	0	0	0	0	0	0
1.5	0.994	0.991	0.988	0.982	0.972	0.96	0.944	0.911	0.874	0.823
1.6	0.997	0.996	0.994	0.991	0.986	0.98	0.972	0.956	0.937	0.911
1.7	0.997	0.996	0.994	0.991	0.986	0.98	0.972	0.956	0.937	0.911
1.8	0.707	0.555	0.406	0.289	0.062	0.008	0	0	0	0
1.9	0.943	0.911	0.822	0.723	0.617	0.478	0.262	0.113	0.024	0
2	0.979	0.966	0.953	0.933	0.894	0.851	0.79	0.674	0.552	0.401
2.1	0.994	0.991	0.988	0.982	0.972	0.96	0.944	0.911	0.874	0.823
2.2	0.997	0.996	0.994	0.991	0.986	0.98	0.972	0.956	0.937	0.911
2.3	0.994	0.991	0.988	0.982	0.972	0.96	0.944	0.911	0.874	0.823
2.4	0.972	0.955	0.937	0.911	0.86	0.802	0.723	0.574	0.428	0.263

DalgaBoyu (µm)	Yol Uzunluğu (km)									
	0.2	**0.5**	**1**	**2**	**5**	**10**	**20**	**50**	**100**	**200**
2.5	0.902	0.844	0.782	0.695	0.536	0.381	0.216	0.064	0.005	0
2.6	0.479	0.261	0.11	0.002	0	0	0	0	0	0
2.7	0.196	0.04	0.004	0	0	0	0	0	0	0
2.8	0.289	0.092	0.017	0.001	0	0	0	0	0	0
2.9	0.86	0.779	0.692	0.574	0.375	0.21	0.076	0.005	0	0
3	0.902	0.844	0.782	0.695	0.536	0.381	0.216	0.064	0.005	0
3.1	0.86	0.779	0.692	0.574	0.375	0.21	0.076	0.005	0	0
3.2	0.894	0.833	0.766	0.674	0.506	0.343	0.184	0.035	0.003	0
3.3	0.93	0.888	0.843	0.779	0.658	0.531	0.377	0.161	0.048	0.005
3.4	0.9972	0.9929	0.9859	0.9721	0.9325	0.8724	0.7695	0.5529	0.3459	0.152
3.5	0.9969	0.9923	0.9847	0.9697	0.927	0.8626	0.7544	0.5385	0.3519	0.1874
3.6	0.9983	0.9957	0.9914	0.9828	0.9577	0.9177	0.8439	0.6634	0.4589	0.2423
3.7	0.9931	0.983	0.9663	0.9344	0.8478	0.7291	0.5581	0.2957	0.1277	0.031
3.8	0.9995	0.9988	0.9976	0.9955	0.9888	0.9777	0.9559	0.8941	0.8013	0.6478
3.9	0.9995	0.9988	0.9976	0.9955	0.9888	0.9777	0.9559	0.8941	0.8013	0.6478

DalgaBoyu (µm)	Yol Uzunluğu (km)									
	0.2	**0.5**	**1**	**2**	**5**	**10**	**20**	**50**	**100**	**200**
4	0.9998	0.9994	0.999	0.998	0.9949	0.9899	0.9799	0.9511	0.9062	0.8266
4.1	0.9999	0.9999	0.9997	0.9995	0.9989	0.9977	0.9954	0.9887	0.9775	0.9557
4.2	1	0.9999	0.9998	0.9997	0.9992	0.9985	0.997	0.9925	0.9852	0.9709
4.3	0.984	0.975	0.972	0.95	0.937	0.91	0.873	0.8	0.722	0.615
4.4	0.972	0.955	0.937	0.911	0.86	0.802	0.723	0.574	0.428	0.263
4.5	0.958	0.932	0.905	0.866	0.79	0.707	0.595	0.4	0.235	0.093
4.6	0.943	0.911	0.874	0.822	0.723	0.617	0.478	0.262	0.113	0.024
4.7	0.972	0.955	0.937	0.911	0.86	0.802	0.723	0.574	0.428	0.263
4.8	0.915	0.866	0.812	0.736	0.595	0.452	0.289	0.117	0.018	0.001
4.9	0.902	0.844	0.782	0.695	0.536	0.381	0.216	0.064	0.005	0
5	0.88	0.811	0.736	0.634	0.451	0.286	0.132	0.017	0	0
5.1	0.839	0.747	0.649	0.519	0.308	0.149	0.041	0.001	0	0
5.2	0.784	0.664	0.539	0.385	0.169	0.052	0.006	0	0	0
5.3	0.707	0.555	0.406	0.239	0.062	0.008	0	0	0	0
5.4	0.611	0.432	0.268	0.116	0.013	0	0	0	0	0

DalgaBoyu (µm)	Yol Uzunluğu (km)									
	0.2	**0.5**	**1**	**2**	**5**	**10**	**20**	**50**	**100**	**200**
5.5	0.479	0.261	0.11	0.035	0	0	0	0	0	0
5.6	0.331	0.121	0.029	0.002	0	0	0	0	0	0
5.7	0.196	0.04	0.004	0	0	0	0	0	0	0
5.8	0.044	0.001	0	0	0	0	0	0	0	0
5.9	0.044	0.001	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0.058	0.003	0	0	0	0	0	0	0	0
6.1	0.112	0.012	0	0	0	0	0	0	0	0
6.2	0.524	0.313	0.153	0.043	0.001	0	0	0	0	0
6.3	0.401	0.182	0.06	0.008	0	0	0	0	0	0
6.4	0.157	0.025	0.002	0	0	0	0	0	0	0
6.5	0.049	0.002	0	0	0	0	0	0	0	0
6.6	0.042	0.001	0	0	0	0	0	0	0	0
6.7	0.162	0.037	0.002	0	0	0	0	0	0	0
6.8	0.196	0.04	0.004	0	0	0	0	0	0	0
6.9	0.25	0.068	0.01	0	0	0	0	0	0	0

DalgaBoyu (µm)	Yol Uzunluğu (km)									
	0.2	**0.5**	**1**	**2**	**5**	**10**	**20**	**50**	**100**	**200**
7	0.569	0.245	0.06	0.004	0	0	0	0	0	0
7.1	0.716	0.433	0.188	0.035	0	0	0	0	0	0
7.2	0.782	0.54	0.292	0.085	0.002	0	0	0	0	0
7.3	0.849	0.664	0.441	0.194	0.017	0	0	0	0	0
7.4	0.922	0.817	0.666	0.444	0.132	0.018	0	0	0	0
7.5	0.947	0.874	0.762	0.582	0.258	0.066	0	0	0	0
7.6	0.922	0.817	0.666	0.444	0.132	0.018	0	0	0	0
7.7	0.978	0.944	0.884	0.796	0.564	0.328	0.102	0.003	0	0
7.8	0.974	0.937	0.878	0.771	0.523	0.273	0.074	0.002	0	0
7.9	0.982	0.959	0.92	0.842	0.658	0.433	0.187	0.015	0	0
8	0.99	0.975	0.951	0.904	0.777	0.603	0.365	0.08	0.006	0
8.1	0.994	0.986	0.972	0.945	0.869	0.754	0.568	0.244	0.059	0.003
8.2	0.993	0.982	0.964	0.93	0.834	0.696	0.484	0.163	0.027	0
8.3	0.995	0.988	0.976	0.953	0.887	0.786	0.618	0.3	0.09	0.008
8.4	0.995	0.987	0.975	0.95	0.88	0.774	0.599	0.278	0.077	0.006

DalgaBoyu (µm)	Yol Uzunluğu (km)									
	0.2	**0.5**	**1**	**2**	**5**	**10**	**20**	**50**	**100**	**200**
8.5	0.994	0.986	0.972	0.944	0.866	0.75	0.562	0.237	0.056	0.003
8.6	0.996	0.992	0.982	0.965	0.915	0.837	0.702	0.411	0.169	0.029
8.7	0.996	0.992	0.983	0.966	0.916	0.839	0.704	0.416	0.173	0.03
8.8	0.997	0.993	0.983	0.966	0.917	0.841	0.707	0.421	0.177	0.031
8.9	0.997	0.992	0.983	0.966	0.918	0.843	0.709	0.425	0.18	0.032
9	0.997	0.992	0.984	0.968	0.921	0.848	0.719	0.44	0.193	0.037
9.1	0.997	0.992	0.985	0.97	0.926	0.858	0.735	0.464	0.215	0.046
9.2	0.997	0.993	0.985	0.971	0.929	0.863	0.744	0.478	0.228	0.052
9.3	0.997	0.993	0.986	0.972	0.93	0.867	0.75	0.489	0.239	0.057
9.4	0.997	0.993	0.986	0.973	0.933	0.87	0.756	0.498	0.248	0.061
9.5	0.997	0.993	0.987	0.973	0.934	0.873	0.762	0.507	0.257	0.066
9.6	0.997	0.993	0.987	0.974	0.936	0.876	0.766	0.516	0.265	0.07
9.7	0.997	0.993	0.987	0.974	0.937	0.878	0.77	0.521	0.27	0.073
9.8	0.997	0.994	0.987	0.975	0.938	0.88	0.773	0.526	0.277	0.077
9.9	0.997	0.994	0.987	0.975	0.939	0.882	0.777	0.532	0.283	0.08

DalgaBoyu (µm)	Yol Uzunluğu (km)									
	0.2	**0.5**	**1**	**2**	**5**	**10**	**20**	**50**	**100**	**200**
10	0.998	0.994	0.988	0.975	0.94	0.883	0.78	0.538	0.289	0.083
10.1	0.998	0.994	0.988	0.975	0.94	0.883	0.78	0.538	0.289	0.083
10.2	0.998	0.994	0.988	0.975	0.94	0.883	0.78	0.538	0.289	0.083
10.3	0.998	0.994	0.988	0.976	0.94	0.884	0.781	0.54	0.292	0.085
10.4	0.998	0.994	0.988	0.976	0.941	0.885	0.782	0.542	0.294	0.086
10.5	0.998	0.994	0.988	0.976	0.941	0.886	0.784	0.544	0.295	0.087
10.6	0.998	0.994	0.988	0.976	0.942	0.887	0.786	0.548	0.3	0.089
10.7	0.998	0.994	0.988	0.976	0.942	0.887	0.787	0.55	0.302	0.091
10.8	0.998	0.994	0.988	0.976	0.941	0.886	0.784	0.544	0.295	0.087
10.9	0.998	0.994	0.988	0.976	0.94	0.884	0.781	0.54	0.292	0.085
11	0.998	0.994	0.988	0.975	0.94	0.883	0.779	0.536	0.287	0.082
11.1	0.998	0.994	0.987	0.975	0.939	0.882	0.777	0.532	0.283	0.08
11.2	0.997	0.993	0.986	0.972	0.931	0.867	0.75	0.487	0.237	0.056
11.3	0.997	0.992	0.985	0.97	0.927	0.859	0.738	0.467	0.218	0.048
11.4	0.997	0.993	0.986	0.971	0.93	0.865	0.748	0.485	0.235	0.055

DalgaBoyu (µm)	Yol Uzunluğu (km)									
	0.2	**0.5**	**1**	**2**	**5**	**10**	**20**	**50**	**100**	**200**
11.5	0.997	0.993	0.986	0.972	0.932	0.868	0.753	0.493	0.243	0.059
11.6	0.997	0.993	0.987	0.974	0.935	0.875	0.765	0.513	0.262	0.069
11.7	0.996	0.99	0.98	0.961	0.906	0.82	0.673	0.372	0.138	0.019
11.8	0.997	0.992	0.982	0.969	0.925	0.863	0.733	0.46	0.212	0.045
11.9	0.997	0.993	0.986	0.972	0.932	0.869	0.755	0.495	0.245	0.06
12	0.997	0.993	0.987	0.974	0.937	0.878	0.77	0.521	0.27	0.073
12.1	0.997	0.994	0.987	0.975	0.938	0.88	0.773	0.526	0.277	0.077
12.2	0.997	0.994	0.987	0.975	0.938	0.88	0.775	0.528	0.279	0.078
12.3	0.997	0.993	0.987	0.974	0.937	0.878	0.77	0.521	0.27	0.073
12.4	0.997	0.993	0.987	0.974	0.935	0.874	0.764	0.511	0.261	0.068
12.5	0.997	0.993	0.986	0.973	0.933	0.871	0.759	0.502	0.252	0.063
12.6	0.997	0.993	0.986	0.972	0.931	0.868	0.752	0.491	0.241	0.058
12.7	0.997	0.993	0.985	0.971	0.929	0.863	0.744	0.478	0.228	0.052
12.8	0.997	0.992	0.985	0.97	0.926	0.858	0.736	0.466	0.217	0.047
12.9	0.997	0.992	0.984	0.969	0.924	0.853	0.728	0.452	0.204	0.041

DalgaBoyu (µm)	Yol Uzunluğu (km)									
	0.2	**0.5**	**1**	**2**	**5**	**10**	**20**	**50**	**100**	**200**
13	0.997	0.992	0.984	0.967	0.921	0.846	0.718	0.437	0.191	0.036
13.1	0.996	0.991	0.983	0.966	0.918	0.843	0.709	0.424	0.18	0.032
13.2	0.996	0.991	0.982	0.965	0.915	0.837	0.701	0.411	0.169	0.028
13.3	0.996	0.991	0.982	0.964	0.912	0.831	0.69	0.397	0.153	0.025
13.4	0.996	0.99	0.981	0.962	0.908	0.825	0.681	0.382	0.146	0.021
13.5	0.996	0.99	0.98	0.961	0.905	0.819	0.67	0.368	0.136	0.019
13.6	0.996	0.99	0.979	0.959	0.902	0.813	0.661	0.355	0.126	0.016
13.7	0.996	0.989	0.979	0.958	0.898	0.807	0.651	0.342	0.117	0.014
13.8	0.996	0.989	0.978	0.956	0.894	0.8	0.64	0.328	0.107	0.011
13.9	0.995	0.988	0.977	0.955	0.891	0.793	0.629	0.313	0.098	0.01

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Mustafa SİVASLIGİL
Doğum Yeri : TOKAT
Doğum Tarihi : 07/06/1980
Medeni Hali : Evli
Yabancı Dili : İngilizce

Eğitim Durumu (Kurum ve Yıl)

Lise : Uşak Lisesi (1998)
Lisans : O.D.T.Ü. Fen Fakültesi Fizik Bölümü (2003)
Yüksek Lisans: O.D.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalı (2006)

Çalıştığı Kurum/Kurumlar ve Yıl

TÜBİTAK BİLGEM İLTAREN 2003-HALEN

Yayınları (SCI ve diğer)

Sivaslıgil, M., Erol, C. B. 2008. Software for the Fast Calculation of Atmospheric Infrared Effects. ITBM&S, Etlingen.

Sivaslıgil, M., Erol, C. B., Esendemir, A. 2009. Infrared Atmospheric Background Modeling: A Fast Model for Computing Infrared Atmospheric Background Effects. LAP, p.53.

Sivaslıgil, M., Erol, C. B., Polat, Ö. M., Sarı, H. 2013. Validation of refractive index structure parameter estimation for certain infrared bands. App. Opt., 52(13), pp. 3127-3133.