KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELEKTRO-OPTİK SİSTEM MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

DENİZ ORTAMINDA ATMOSFERİK TÜRBÜLANSIN ELEKTRO-OPTİK KEŞİF GÖRÜNTÜLEME SİSTEMLERİ ÜZERİNDEKİ ETKİSİ VE ATMOSFERİK TÜRBÜLANS TAHMİNİ

BURAK FERDİ AKTAN

KOCAELİ 2024

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELEKTRO-OPTİK SİSTEM MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

DENİZ ORTAMINDA ATMOSFERİK TÜRBÜLANSIN ELEKTRO-OPTİK KEŞİF GÖRÜNTÜLEME SİSTEMLERİ ÜZERİNDEKİ ETKİSİ VE ATMOSFERİK TÜRBÜLANS TAHMİNİ

BURAK FERDİ AKTAN

Prof. Dr. Elif KAÇAR **Danışman, Kocaeli Üniv.**	**.....**
Prof. Dr. Emine CAN **Jüri Üyesi, Medeniyet Üniv.**	**.....**
Doç. Dr. Erhan AKMAN **Jüri Üyesi, Kocaeli Üniv.**	**.....**

Tezin Savunulduğu Tarih 26.06.2024

ETİK BEYAN VE ARAŞTIRMA FONU DESTEĞİ

Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez/proje çalışmasında,

- Bu tezin/projenin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu,
- Çalışmamın hazırlık, veri toplama, analiz ve bilgilerin sunumu olmak üzere tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallara uygun davrandığımı,
- Bu çalışma kapsamında elde edilen tüm veri ve bilgiler için kaynak gösterdiğimi ve bu kaynaklara kaynakçada yer verdiğimi,
- Bu çalışmanın Kocaeli Üniversitesi'nin abone olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Fen Bilimleri Enstitüsü'nün belirlemiş olduğu ölçütlere uygun olduğunu,
- Kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- Tezin/Projenin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez/proje çalışması olarak sunmadığımı,

beyan ederim.

■ Bu tez/proje çalışmasının herhangi bir aşaması hiçbir kurum/kuruluş tarafından maddi/alt yapı desteği ile desteklenmemiştir.

☐ Bu tez/proje çalışması kapsamında üretilen veri ve bilgiler .....

Herhangi bir zamanda, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçları kabul ettiğimi bildiririm.

Burak Ferdi AKTAN

YAYIMLAMA VE FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI

Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından onaylanan lisansüstü tezimin/projemin tamamını veya herhangi bir kısmını, basılı ve elektronik formatta arşivleme ve aşağıda belirtilen koşullarla kullanıma açma izninin Kocaeli Üniversitesi'ne verdiğimi beyan ederim. Bu izinle Üniversiteye verilen kullanım hakları dışındaki tüm fikri mülkiyet haklarım bende kalacak, tezimin/projemin tamamının ya da bir bölümünün gelecekteki çalışmalarda (makale, kitap, lisans ve patent vb.) kullanımı bana ait olacaktır.
Tezin/projenin kendi özgün çalışmam olduğunu, başkalarının haklarını ihlal etmediğimi ve tezimin/projenin tek yetkili sahibi olduğumu beyan ve taahhüt ederim. Tezimde yer alan telif hakkı bulunan ve sahiplerinden yazılı izin alınarak kullanılması zorunlu metinlerin yazılı izin alarak kullandığımı ve istenildiğinde suretlerini Üniversiteye teslim etmeyi taahhüt ederim.
Yükseköğretim kurulu tarafından yayınlanan ***"Lisansüstü Tezlerin Elektronik Ortamda Toplanması, Düzenlenmesi ve Erişime Açılmasına İlişkin Yönerge"*** kapsamında tezim aşağıda belirtilen koşullar haricinde YÖK Ulusal Tez Merkezi/ Kocaeli Üniversitesi Kütüphaneleri Açık Erişim Sisteminde erişime açılır.

☐ Enstitü yönetim kurulu kararı ile tezimin/projemin erişime açılması mezuniyet tarihinden itibaren 2 yıl ertelenmiştir.
☐ Enstitü yönetim kurulu gerekçeli kararı ile tezimin/projemin erişime açılması mezuniyet tarihinden itibaren 6 ay ertelenmiştir.
■ Tezim/projem ile ilgili gizlilik kararı verilmemiştir.

Burak Ferdi AKTAN

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Atmosferik türbülans, elektro-optik keşif gözetleme sistemleri, lazerler, astronomi gibi alanlarda icra edilen çalışmalara olumsuz etki meydana getiren bir atmosferik fenomendir. Atmosferik türbülans meteorolojik koşullara göre değişkenlik göstermektedir. Meteorolojik parametrelerin ölçülmesi ve belirlenmesi, atmosferik türbülansın tahmininde kullanılabilmektedir. Atmosferik türbülans, ölçülebilen bir parametre olmakla birlikte meteorolojik parametrelerin atmosferik türbülans tahmin modellerine yerleştirilerek tahmin edilebilmesine imkan sağlamaktadır. Bu çalışmada atmosferik türbülansın kısa dalga kızılötesi kameranın keşif gözetleme performansı üzerinde yarattığı etki ve atmosferik türbülans tahminine yönelik çalışmalar icra edilmiştir.

Yüksek lisans eğitimim boyunca güler yüzü ve anlayışı ile desteğini benden esirgemeyen, bilgi ve tecrübesi ile hayatıma yön veren, çok değerli danışman hocam Prof. Dr. Elif KAÇAR'a çok teşekkür ederim.

Her zaman yanımda olan ve benden desteğini esirgemeyen, başarılarımda en büyük katkısı olan annem Nurten Ülkü AKTAN ve babam Nusret AKTAN'a, kardeşim Aleyna AKTAN'a sonsuz teşekkür ederim. Yüksek lisans eğitimim boyunca tüm desteğini veren ve beni motive eden kız arkadaşım Tuğçe KILIÇ'a çok teşekkür ederim.

Haziran – 2024 Burak Ferdi AKTAN

İÇİNDEKİLER

ETİK BEYAN VE ARAŞTIRMA FONU DESTEĞİ i
YAYIMLAMA VE FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI ii
ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR iii
ŞEKİLLER DİZİNİ vi
TABLOLAR DİZİNİ viii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ ix
ÖZET x
ABSTRACT xi
1. GİRİŞ 1
2. ATMOSFERİK TÜRBÜLANS, ETKİLERİ VE MODELLEME YÖNTEMLERİ 1
2.1. Atmosferin Yapısı 1
2.2. Atmosferik Türbülans 4
2.3. Atmosferik Türbülans Tahmin Modelleri 5
2.4. Elektro-Optik Keşif Gözetleme Sistemleri 7
3. DENİZ ORTAMINDA ATMOSFERİK TÜRBÜLANS ÖLÇÜM VE TAHMİNLERİ 11
3.1. Deneysel Çalışmalarda Kullanılan Ölçüm Cihazları 11
3.1.1. Atmosferik Türbülans Ölçer 11
3.1.2. SWIR Kamera 12
3.1.3. Meteorolojik Ölçüm Sensörleri 14
3.2. Meteorolojik Veriler ve Atmosferik Türbülans Ölçümleri 14
3.2.1. Meteorolojik Verilerin Toplanması 15
3.2.2. Atmosferik Türbülans Ölçümleri 17
3.2.3. SWIR Kamera Görüntüleri 20
3.3. Atmosferik Türbülans Tahmini 22
3.3.1. Sadot-Kopeika Ampirik Modeli 22
3.3.2. Atmosferik Türbülans Tahmini 25
3.4. Ölçülen ve Tahmini Atmosferik Türbülans Değerlerinin Karşılaştırılması 27
4. ATMOSFERİK TÜRBÜLANSIN ELEKTRO-OPTİK GÖRÜNTÜLEME SİSTEMİNİN PERFORMANSINA ETKİ ANALİZİ 28
4.1. DRI Analizleri 28
4.1.1. Ölçülen Atmosferik Türbülans Parametresi Kullanılan DRI Analizleri 29
4.1.2. Tahmini atmosferik türbülans parametresi kullanılan DRI analizleri 33
4.2. Karşılaştırmalı DRI Analizleriyle Elektro-Optik Detektörün Performans Değerlendirmesi 37
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER 44
KAYNAKLAR 46
KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER 50

ÖZGEÇMİŞ 51

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Atmosferin katmanları (TUA, 2021)..... 2
Şekil 2.2. Atmosferin dalgaboyuna bağlı absorbsiyon spektrumu (Garlinska ve diğerleri, 2020).3
Şekil 2.3. Elektro-optik detektör üzerinde türbülans etkisi (Jin ve diğ., 2021). 4
Şekil 2.4. Kolmogorov enerji spektrumu (Birnir, 2013). 5
Şekil 2.5. Elektro-optik keşif gözetleme sistemi (Gupta, 2008). 9
Şekil 2.6. Adaptif optik sistemi (Dinstein ve diğerleri, 1988)..... 10
Şekil 2.7. Satürn ve Neptün gezegenlerine ait (a) adaptif optiksiz ve (b) adaptif optikli kamera görüntüleri (Charnotskii, 2021). 10
Şekil 3.1. Bir alıcı ve bir vericiden oluşan 850 nm dalga boyunda elektromanyetik dalga yayan Scintec BLS 450 türbülans ölçer. 12
Şekil 3.2. Atmosferik türbülans etkilerinin gözlenmesi için kullanılan kısa dalga kızılötesi bölgede çalışan NIT WIDY SENS SWIR kamera. 13
Şekil 3.3. Meteoroloji sensörü (a), görüş sensörü (b). 14
Şekil 3.4. OCA.23 tarihli meteorolojik veriler. 16
Şekil 3.5. NİS.23 tarihli meteorolojik veriler. 16
Şekil 3.6. TEM.23 tarihli meteorolojik veriler. 17
Şekil 3.7. EKİ.23 tarihli meteorolojik veriler. 17
Şekil 3.8. Çalışma yapılan sahanın uydu görüntüsü. 18
Şekil 3.9. Türbülans ölçer vericisi (a) ve alıcısı (b) arazi yerleşimi. 18
Şekil 3.10. OCA.23 tarihli ölçülen $Cn2$ değerleri. 19
Şekil 3.11. NIS.23 tarihli ölçülen $Cn2$ değerleri. 19
Şekil 3.12. TEM.23 tarihli ölçülen Cn2 değerleri. 20
Şekil 3.13. EKİ.23 tarihli ölçülen $Cn2$ değerleri 20
Şekil 3.14. OCA.23 tarihli zayıf-orta şiddet türbülansta **(a)** 30 km ve **(b)** 20 km mesafelerde elde edilen SWIR kamera görüntüleri. 21
Şekil 3.15. TEM.23 tarihli orta şiddetli türbülansta **(a)** 30 km ve **(b)** 20 km mesafelerde elde edilen SWIR kamera görüntüleri..... 21
Şekil 3.16. EKİ.23 tarihli orta-yüksek şiddetli türbülansta **(a)** 30 km ve **(b)** 20 km mesafelerde elde edilen SWIR kamera görüntüleri. 22
Şekil 4.1. OCA.23 tarihinde ölçülen Cn2 atmosferik türbülans parametresi 1,63 x 10^{-15} $m^{-2/3}$ kullanılarak yapılan DRI performans analizi……30
Şekil 4.2. NİS.23 tarihinde ölçülen Cn2 atmosferik türbülans parametresi 1,25 x 10-14 m-2/3 kullanılarak yapılan DRI performans analizi. 31
Şekil 4.3 TEM.23 tarihinde ölçülen C^2 atmosferik türbülans parametresi 1,48 x 10^{-14} $m^{-2/3}$ kullanılarak yapılan DRI performans analizi. 32
Şekil 4.4. EKİ.23 tarihinde ölçülen Cn2 atmosferik türbülans parametresi 1,04 x 10^{-13} $m^{-2/3}$ kullanılarak yapılan DRI performans analizi. 33
Şekil 4.5. OCA.23 tarihli verilerle tahmin edilen Cn2 atmosferik türbülans parametresi 1 x 10-14 m-2/3 kullanılarak yapılan DRI performans analizi. 34
Şekil 4.6. NİS.23 tarihli verilerle tahmin edilen Cn2 atmosferik türbülans parametresi 1 x 10^{-14} $m^{-2/3}$ kullanılarak yapılan DRI performans analizi. 35
Şekil 4.7. TEM.23 tarihli verilerle tahmin edilen Cn2 atmosferik türbülans parametresi 1 x 10^{-13} $m^{-2/3}$ kullanılarak yapılan DRI performans analizi. 36
Şekil 4.8. EKİ.23 tarihli verilerle tahmin edilen Cn2 atmosferik türbülans parametresi 1 x 10^{-13} $m^{-2/3}$ kullanılarak yapılan DRI performans analizi. 37
Şekil 4.9. Ölçülen Cn2 için karşılaştırmalı tespit menzilleri. 38
Şekil 4.10. Ölçülen Cn2 için karşılaştırmalı tanıma menzilleri. 39
Şekil 4.11. Ölçülen Cn2 için karşılaştırmalı kimliklendirme menzilleri. 39
Şekil 4.12. Tahmin Edilen Cn2 için karşılaştırmalı tespit menzilleri..... 40
Şekil 4.13. Tahmin Edilen Cn2 için karşılaştırmalı tanıma menzilleri. 40

Şekil 4.14. Tahmin Edilen Cn2 için karşılaştırmalı kimliklendirme menzilleri. 41
Şekil 4.15. Ocak ayına ait tahmin edilen ve ölçülen Cn2 için DRI performansı karşılaştırma grafiği. 42
Şekil 4.16. Nisan ayına ait tahmin edilen ve ölçülen Cn2 için DRI performansı karşılaştırma grafiği. 42
Şekil 4.17. Temmuz ayına ait tahmin edilen ve ölçülen Cn2 için DRI performansı karşılaştırma grafiği. 43
Şekil 4.18. Ekim ayına ait tahmin edilen ve ölçülen Cn2 için DRI performansı karşılaştırma grafiği. 43

TABLOLAR DİZİNİ

Tablo 3.1. Meteorolojik ve atmosferik verilerin ölçüldüğü zaman aralıkları. 15
Tablo 3.2. Modelde kullanılan zamanın ağırlık katsayıları (Sadot ve Kopeika, 1992). 23
Tablo 3. 3. Modelde kullanılan regresyon katsayıları (Sadot ve Kopeika, 1992). 24
Tablo 3.4. Atmosferik türbülans tahmini hesaplamalarında kullanmak üzere toplanan meteorolojik veriler. 25
Tablo 3.5. Ölçülen ve hesaplanan atmosferik türbülans değerleri. 27
Tablo 4.1. OCA.23 tarihinde ölçülen C^2 parametresini içeren DRI analizinden elde edilen menzil-performans değerleri. 30
Tablo 4.2. NİS.23 tarihinde ölçülen $Cn2$ parametresini içeren DRI analizinden elde edilen menzil-performans değerleri. 31
Tablo 4.3. TEM.23 tarihinde ölçülen C^2 parametresini içeren DRI analizinden elde edilen menzil-performans değerleri. 32
Tablo 4.4 EKİ.23 tarihinde ölçülen $Cn2$ parametresini içeren DRI analizinden elde edilen menzil-performans değerleri. 33
Tablo 4.5. OCA.23 tarihli verilerle tahmin edilen $Cn2$ parametresini içeren DRI analizinden elde edilen menzil-performans değerleri. 34
Tablo 4. 6. NİS.23 tarihli verilerle tahmin edilen $Cn2$ parametresini içeren DRI analizinden elde edilen menzil-performans değerleri. 35
Tablo 4.7. TEM.23 tarihli verilerle tahmin edilen $Cn2$ parametresini içeren DRI analizinden elde edilen menzil-performans değerleri. 36
Tablo 4.8. EKİ.23 tarihli verilerle tahmin edilen $Cn2$ parametresini içeren DRI analizinden elde edilen menzil-performans değerleri. 37

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

C_n^2 : Atmosferin kırıcılık indisi değişim şiddeti.
T : Kelvin cinsinden sıcaklık.
TH : Geçici saat aralığı.
W : Zamanın ağırlık katsayısı.
WS : Rüzgar hızı.

Kısaltmalar

DRI :Detection, Recognation, Identification (Tespit, Teşhis ve Kimliklendirme).
EKİ.23 :10 Ekim 2023 tarihine ait veri seti RH: Relative Humidity (Bağıl nem).
LWIR : Long Wave İnfrared (Uzun Dalga Boyu Kızılötesi)
MWIR : Mid Wave İnfrared (Orta Dalga Boyu Kızılötesi)
SWIR : Short Wave İnfrared (Kısa Dalga Boyu Kızılötesi)
NİS.23 : 05 Nisan 2023 tarihine ait veri seti
NV-IPM : Night Vision Integrated Performance Model
OCA.23 : 27 Ocak 2023 tarihine ait veri seti
TEM.23 : 19 Temmuz 2023 tarihine ait veri seti

DENİZ ORTAMINDA ATMOSFERİK TÜRBÜLANSIN ELEKTRO-OPTİK KEŞİF GÖRÜNTÜLEME SİSTEMLERİ ÜZERİNDEKİ ETKİSİ VE ATMOSFERİK TÜRBÜLANS TAHMİNİ

ÖZET

Elektro-optik keşif gözetleme sistemlerinin performansını belirlemek çözülmesi zor bir problemdir. Bu problemi etkileyen parametrelerden biri olan atmosferik türbülans, atmosferin kırıcılık indisinin bir ölçüsüdür. Atmosferin farklı gaz ve aeorosol içeriklerinden oluşması aynı zamanda meteorolojik etkilere maruz kalması nedeniyle oluşan atmosferik türbülans, elektro- optik keşif gözetleme sistemleri üzerinde performans kayıpları oluşturmaktadır. Bu nedenle atmosferik türbülansın ölçülmesi ya da tahmin edilmesi atmosferik türbülans kaynaklı bozulmaların etkisini kestirmek için önemlidir. Atmosferik türbülans ölçümleri ile atmosferik türbülans tahmini arasındaki korelasyonu belirlemek için Marmara bölgesinde 2023 yılının 4 farklı mevsiminde ocak, nisan, temmuz ve ekim aylarında meteorolojik parametreler toplanarak atmosferik türbülans tahmin modeli yardımıyla türbülans tahminleri yapılmış aynı zamanda aynı mevkiide atmosferik türbülans ölçümleri yapılarak sonuçlar karşılaştırılmıştır. Atmosferik türbülansın keşif gözetleme sistemleri üzerindeki etkisinin görülmesi amacıyla meteorolojik ölçüm yapılan ve atmosferik türbülans ölçümü yapılan mevkiide 20 km ve 30 km uzaklıktaki rüzgar türbini görüntüleri SWIR (kısa dalga boylu kızılötesi) kamera ile toplanmıştır. Atmosferik türbülans tahmini için Sadot-Kopeika tahmin modeli kullanılmıştır. Bu tahmin modelinde atmosferik türbülans parametresi, meteorolojik parametreler olan sıcaklık, rüzgar hızı, bağıl nem gibi makrometeorolojik parametreler kullanılarak belirlenebilmektedir. Meteorolojik parametrelerin toplanarak tahmin edilen atmosferik türbülans değeri ile eş zamanlı yapılan türbülans ölçüm sonuçları karşılaştırıldığında birbirleriyle örtüşüğü görülmüştür. Tahmin edilen atmosferik türbülans değerleri ve ölçülen atmosferik türbülans değerlerinin elektro-optik bir sensörün performansı üzerindeki etkisini incelemek için elektro- optik sensöre yönelik DRI (Tespit-Teşhis-Kimliklendirme) analizleri, NVIPM (Night Vision Integrated Performance Model) yazılımı yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Elektro-optik sensörün, atmosferin, gözlemcinin ve hedefin modellenmesinin ardından yapılan DRI analizleri sonuçları karşılaştırıldığında, tahmin edilen atmosferik türbülans değerlerinin yarattığı performans kayıpları sonuçlarının, ölçülen atmosferik türbülans değerlerinin yarattığı performans kayıpları ile örtüştüğü gözlemlenmiştir. Gelecek çalışmalar için, algoritmaların elektro-optik sensör görüntüleri, meteorolojik parametreler ve atmosferik türbülans değerleri üzerinde derin öğrenme ile eğitilmesinden sonra, elektro-optik sensörlerin görüntülerdeki piksel bazlı bozulmaya dayalı anlık atmosferik türbülansı belirleyebileceği öngörüsünde bulunulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Atmosferik Türbülans, DRI, Elektro-optik, NVIPM, SWIR.

THE IMPACT OF ATMOSPHERIC TURBULENCE ON ELECTRO-OPTICAL SURVEILLANCE IMAGING SYSTEMS IN A MARITIME ENVIRONMENT AND ATMOSPHERIC TURBULENCE PREDICTION

ABSTRACT

Determining the performance of electro-optical surveillance systems is a difficult problem to solve. Atmospheric turbulence, one of the parameters affecting this problem, is a measure of the refractive index of the atmosphere. Atmospheric turbulence, which occurs because the atmosphere is composed of different gas and aeorosol contents and is exposed to meteorological effects, causes performance losses on electro-optical surveillance systems. herefore, measuring or predicting atmospheric turbulence is important for estimating the impact of atmospheric turbulence induced disturbances. In order to determine the correlation between atmospheric turbulence measurements and atmospheric turbulence prediction, meteorological parameters were collected in January, April, July and October in 4 different seasons of 2023 in the Marmara region and turbulence predictions were made with the help of atmospheric turbulence prediction model and atmospheric turbulence measurements were made at the same location and the results were compared. In order to see the effect of atmospheric turbulence on surveillance systems, wind turbine images were collected with a SWIR (short wavelength infrared) camera at a distance of 20 km and 30 km from the location where meteorological measurements and atmospheric turbulence measurements were made. Sadot-Kopeika prediction model was used for atmospheric turbulence estimation. In this prediction model, atmospheric turbulence parameter can be determined by using macrometeorological parameters such as temperature, wind speed and relative humidity. When the atmospheric turbulence value estimated by summing the meteorological parameters is compared with the simultaneous turbulence measurement results, it is seen that they overlap with each other. In order to examine the effect of predicted atmospheric turbulence values and measured atmospheric turbulence values on the performance of an electro-optical sensor, DRI (Detection-Diagnostic-Identification) analyses for the electro-optical sensor were performed with the help of NVIPM (Night Vision Integrated Performance Model) software. After modeling the electro-optical sensor, the atmosphere, the observer and the target, the results of the DRI analyses were compared and it was observed that the performance losses caused by the predicted atmospheric turbulence values coincided with the performance losses caused by the measured atmospheric turbulence values. For future works, after training the algorithms with deep learning on electro-optical sensor images, meteorological parameters and atmospheric turbulence values, it is foreseen that electro-optical sensors can determine instantaneous atmospheric turbulence based on pixel-based distortion in images.

Keywords: Atmospheric Turbulence, DRI, Electro-Optical, NVIPM, SWIR.

1. GİRİŞ

Atmosferik türbülans, optik türbülans olarak da bilinen atmosferin kırıcılık indisindeki dalgalanmalar olarak adlandırılır. Sıcaklık, nem, rüzgar şiddeti, basınç, havadaki gaz karışımının içeriği, havada asılı kalan aerosoller gibi parametre değişimleri atmosferin kırıcılık indisinde değişimler meydana getirir (Xu ve diğ., 2021). Atmosferik türbülans nedeniyle oluşan kırıcılık indisi değişimleri küçüktür ancak atmosferik yol uzadıkça atmosfer içerisinde ilerleyen dalga üzerinde kümülatif olarak büyüyerek bozucu bir etkiye yol açar. Bu etki elektro-optik sistemlerin performansını önemli ölçüde değiştirmektedir.

Elektro-optik keşif gözetleme sistemleri, özellikle son yıllarda gelişen detektör, soğutma teknolojileri, görüntü işleme algoritmaları, optik tasarımlar gibi teknolojiler nedeniyle savunma sanayi başta olmak üzere, tıp, sanayi, tarım, astronomi, mobil cihaz teknolojileri gibi birçok alanda kendine yer bulmuştur (Künzner ve diğ., 2010, Lahiri ve diğ., 2012, Glavas ve diğ., 2018). Bu sistemler, kullanım alanlarına göre elektromanyetik spektrumun farklı dalga boylarında özelleşerek algılama yapmaktadırlar. Elektro-optik keşif gözetleme sistemleri, bir radar gibi aktif bir elektromanyetik yayın yapmasına gerek kalmadan, kaynaktan gelen radyasyonu algılama prensibine göre çalışarak, pasif olarak kullanıcıya çevresel farkındalık sağladığı için askeri uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır (Hou ve diğ., 2022). Bu tez çalışmasının konusu olan ve askeri uygulamalarda kullanılan elektro-optik keşif gözetleme sistemleri, elektromanyetik spektrumun optik bandında algılama yapmaktadırlar.

Atmosferik türbülans, elektro-optik sistemler için bir problemdir, türbülans nedeniyle sistemlerin elde ettiği görüntülerde bozulmalar meydana gelir ve bu sensörlerin performansını büyük ölçüde azaltabilir (Tunick, 1998). Bunun nedeni keşif yapılacak/algılanacak bölgedeki hedeften/kaynaktan gelen ışımanın elektro-optik sistemin sensörüne gelene kadar geçtiği atmosferik yol boyunca zayıflamasıdır. Hedeften/kaynaktan gelen ışımanın atmosferin bozucu etkilerine maruz kalması nedeniyle askeri uygulamalarda önem taşıyan elektro-optik sensörün performansının sınırlarını belirlemek zordur. Hem savaşta hem de barışta gözetlenen unsurun tespit, tanıma, kimliklendirme menzilleri atmosferik şartlara, bununla birlikte atmosferik türbülans kaynaklı atmosferde oluşan kırıcılık indisi değişimlerine göre de değişkenlik göstermektedir. Atmosferik türbülansın bozucu etkisi yalnızca pasif algılama yapan

elektro-optik sensörleri değil aynı zamanda atmosferde ilerleyen lazer hüzmelerinde de bozulmalara yol açmaktadır. Atmosferde oluşan kırılma indisi değişimleri lazer hüzmenin karakteristiğini bozmakta, enerjisini azaltmaktadır. Yine mesafeye bağlı olarak mesafe arttıkça bu bozucu etkinin şiddeti artış göstermektedir.

Lazer mesafe bulucular, yüksek güçlü lazer silahları, lazer hedef işaretleyiciler, serbest uzay haberleşmesinde kullanılan sistemler gibi birçok askeri uygulaması bulunan lazerler, özellikle elektro-optik keşif gözetleme sistemleri ile birlikte çalışarak elektromanyetik spektrumun optik tayfında askeri uygulamalarda kullanılmaktadırlar. Atmosferik türbülans; serbest uzay haberleşmesinde sinyal gürültü oranını artırarak, yüksek güçlü lazer silahı gibi uygulamalarda lazer gücünü azaltarak, lazer mesafe bulucu gibi hedeften yansıyan hüzmenin tekrar kaynağa dönmesi gereken uygulamalarda aynı atmosferik yolu iki kez kat etmesi sonucu hüzmeyi zayıflatıp bu nedenle ölçülebilen menzillerde düşüşlere yol açarak, lazer hedef işaretleyici gibi uygulamalarda hüzme gezinmesi (beam wander) etkisi (Trichili ve diğ., 2020) yaratarak hassas atış gerektiren durumlarda hata menzilini artırmaktadır.

Yeryüzünün farklı bölgelerinde olduğu gibi yılın farklı mevsimlerinde de atmosferik türbülansın etkileri değişiklik gösterir. Sıcaklık nedeniyle oluşan yer ile hava arasındaki ısı transferi ve basınç dalgalanmaları nedeniyle atmosferik türbülans, yere yakın yerlerde çok güçlü olabilir. Rakım arttıkça havanın sıcaklığı düşer ve türbülansa neden olan dalgalanmalar azalır (Tunick ve diğ., 2005). Atmosferik türbülans parametresinin belirlenmesinde zorluklar bulunmakla birlikte ölçülebilen bir parametredir. Atmosferik türbülansı tam olarak açıklayan kesin bir teori henüz bulunmamaktadır. Bununla birlikte, atmosferik türbülansın doğasını anlamak ve etkilerini açıklamak için çeşitli teoriler ve modeller geliştirilmiştir (Hudcova ve Wilfert 2017, Yıldız, 2017, Birnir, 2013, Wei ve Wllmarth, 1989, Zaman ve diğ., 1981). Bu tez çalışmasında, ülkemizin Marmara bölgesinde faklı mevsimlerde deniz seviyesinde hem atmosferik türbülans ölçümleri gerçekleştirildi hem de yarı ampirik hesaplamalar yapıldı ve atmosferik türbülansın elektro-optik sensör performansı üzerindeki etkileri irdelendi.

Bu tez çalışmasının ana konusu olan atmosferik türbülans ve elektro-optik keşif gözetleme sistemleri hakkında genel bilgiler ile tez çalışmasının literatürdeki yerini irdeleyen literatür bilgisi tezin ikinci bölümünde verildi. Tez çalışması kapsamında, 2023

yılına ait farklı mevsimlerde Tuzla bölgesinde gerçekleştirilen deniz ortamında atmosferik türbülans ölçümleri ve hesaplanan tahmin sonuçları tezin üçüncü bölümünde verildi. Bu bölümde sunulan ölçülen ve hesaplanan atmosferik türbülans değerleri kullanılarak tezin dördüncü atmosferik türbülansın elektro-optik sistem performansına etkilerinin değerlendirme sonuçları verildi. Sonuçlar ve öneriler kısmında da bu tez çalışmasında irdelenen problemin devam eden çalışmalarla nasıl geliştirilebileceği konusunda öngörülere yer verildi.

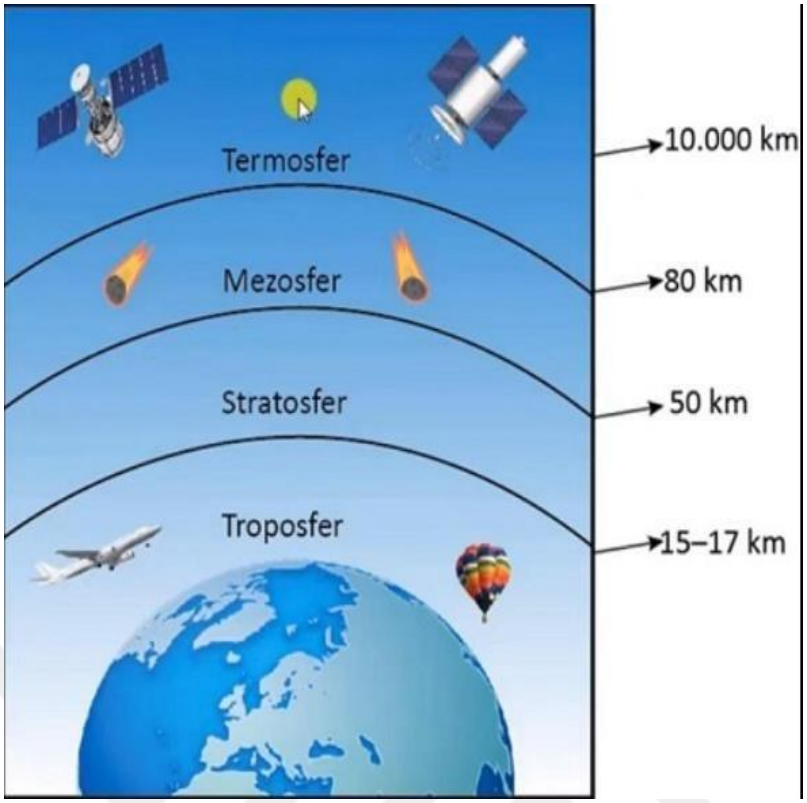
2. ATMOSFERİK TÜRBÜLANS, ETKİLERİ VE MODELLEME YÖNTEMLERİ

Atmosferik türbülans; atmosferi oluşturan gazların sıcaklık, nem, rüzgâr gibi meteorolojik koşulların değişmesiyle meydana gelen hava hareketleri olarak açıklanır. Atmosferik türbülans, bu değişimler ile atmosferin kırılma indisi değişimine yol açar (Andrews ve diğ., 2001). Kırılma indisi değişimi, atmosferde optik tayfta yayılan dalgaları etkileyerek bozulmalarına neden olur. Atmosferik türbülansın yarattığı kırılma indisi değişimine ek olarak optik dalgaların atmosfer içerisinde bozulmasına ve zayıflamasına yol açan soğurma, saçılma gibi etkilerde bulunmaktadır. Elektro- optik keşif gözetleme sistemleri, lazer silahları, astronomik gözlem istasyonları optik dalgaların bozulması nedeniyle elde edilen görüntülerin kalitesinin düşmesine, atmosferde yayılan lazer hüzmelerinin zayıflamasına ve gezinmesine neden olmaktadır (Hulea ve diğ., 2016).

Bu bölümde; deniz ortamında atmosferik türbülansın elektro-optik keşif görüntüleme sistemleri üzerindeki etkisi incelemek amacıyla tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen deneysel çalışmalar ve hesaplamaların altyapısını oluşturan bir literatür bilgisi verilmiş ve çalışmanın literatürdeki yeri irdelenmiştir.

2.1. Atmosferin Yapısı

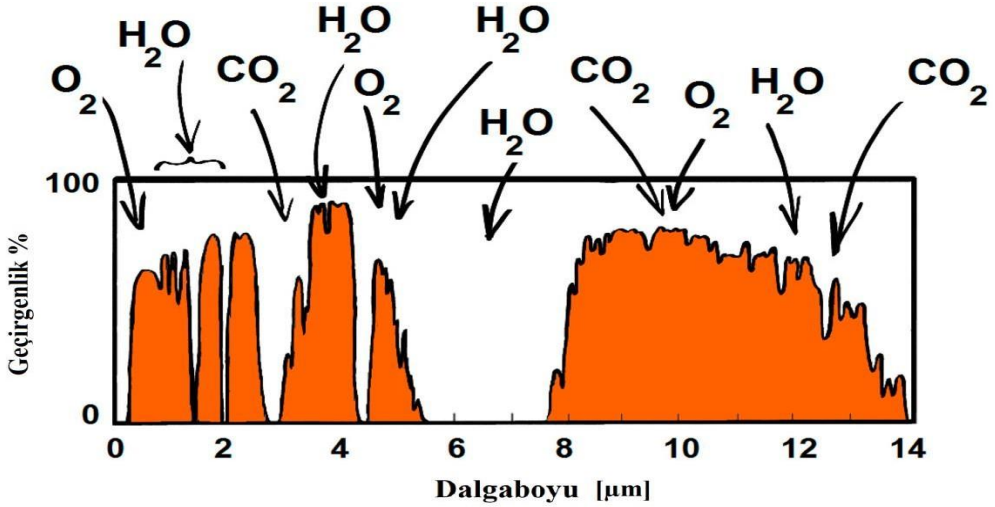
Dünyanın atmosferi troposfer, stratosfer, mezosfer ve termosfer olarak adlandırılan dört katmana bölünmüştür. Şekil 2.1' de yerden yüksekliklerine göre gösterilen (Xu ve diğ., 2021) bu katmanlar, hava sıcaklığının yükseklikle birlikte değişen azalışları ve artışlarıyla tanımlanır. Katmanlar arasındaki sınırlara tropopoz, stratopoz ve mezopoz denir. Atmosferin en alt katmanı olan troposfer, gezegendeki yaşamı destekleyen ve havanın oluştuğu katmandır. Bu katmandaki gazların yoğunluğu yükseklikle azaldıkça hava yoğunluğu azalır. Bu nedenle troposferdeki sıcaklık da yükseklikle birlikte azalır. Daha yükseğe tırmandıkça sıcaklık tropopozda ortalama 62°F'den (17°C) -60°F'ye (-51°C) düşer (Buis, 2019). Bu düşüş, dağların yüksek kesimlerinde karşılaşılan düşük sıcaklıkları açıklamaktadır. Her ne kadar ortalama sıcaklık troposferde yükseklikle azalsa da, atmosferin yapısı, özellikle troposferin tabanında, dünya gündüzleri ısınıp geceleri soğudukça, mevsimler değiştikçe ve hava sistemleri değiştikçe zamanla önemli ölçüde değişir.



Şekil 2.1. Atmosferin katmanları (TUA, 2021).

Atmosferin dikey yapısı, yükseklikle birlikte hava yoğunluğu ve basıncında üstel bir azalma ile karakterize edilir. Hava yoğunluğu, atmosferin birim hacmi başına kütlesidir; örneğin metreküp başına kilogram veya fit küp başına pound cinsinden ifade edilir. Hava basıncı, ölçüm noktasının üzerindeki hava moleküllerinin ağırlığının birim alana uyguladığı kuvvettir; örneğin milibar veya inç kare başına pound cinsinden ifade edilir. Dolayısıyla herhangi bir seviyedeki hava basıncı, o seviyenin üzerindeki hava sütununun ağırlığının bir ölçümüdür. Dünya atmosferinin bir "kenarı" olmamasına rağmen, hava moleküllerinin yaklaşık %99,9'u (ve dolayısıyla atmosferin ağırlığı) 50 km'nin (31 mil) altında bulunur (Whiteman, 2000). Bu nedenle yüksek lazer güç yoğunluğu gerektiren uzun menzilli lazer uygulamalarında lazeri dar hüzme ile iletmek lazer gücünde azalmalara neden olmaktadır.

Atmosfer içerisinde bulunan gaz karışımı nedeniyle atmosfer içerisinde yayılan elektromanyetik dalgalar soğurulmalara ve saçılmalara maruz kalır. Su buharı (H_2O), karbondioksit (CO_2), Azot (N), Ozon (O_3) gibi gazlar nedeniyle fotonlar soğurulur. Şekil 2.2'de atmosferin dalgaboyuna bağlı absorbsiyon spektrumu verilmiştir (Garlinska ve diğ., 2020).



Şekil 2.2. Atmosferin dalgaboyuna bağlı absorbsiyon spektrumu (Garlinska ve diğ., 2020).

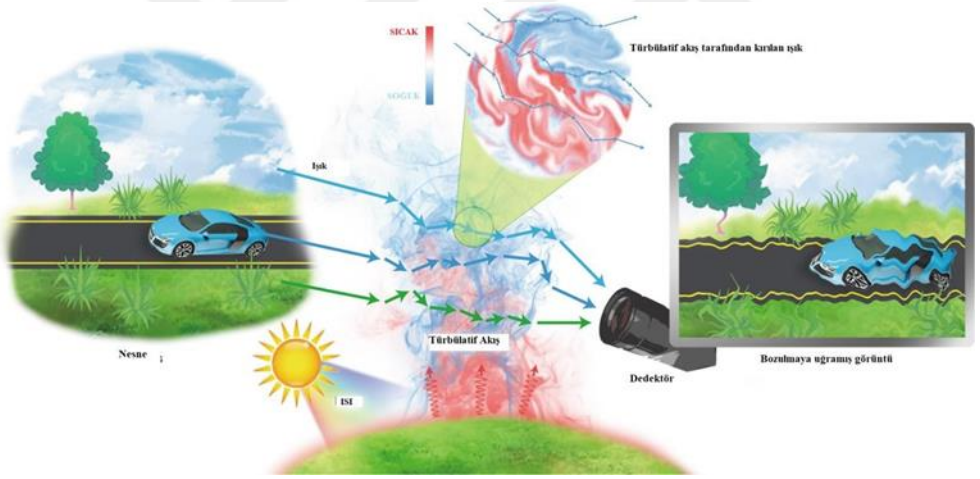
Atmosferde bulunan parçacıklar veya gazlı moleküller elektromanyetik ışımanın orijinal yolundan sapmasına neden olduğunda atmosferik saçılma meydana gelir. Saçılmanın miktarı; parçacıkların ve gaz moleküllerinin boyutuna bağlı olarak radyasyonun dalga boyu, parçacıkların ve gazların miktarı ve radyasyonun atmosferde kat ettiği mesafe gibi çeşitli faktörlere bağlıdır (Hulea ve diğ., 2016). Açık bir günde renkler parlak ve canlı olur, gözlerimiz veya benzer bir uzaktan sensör tarafından algılanan güneş ışığının yaklaşık %95'i nesnelerden yansıyan ışıma, %5'i de atmosfere saçılan ışıktır. Bulutlu veya puslu bir günde renkler soluktur ve gözümüze gelen ışığın çoğu dağınık ışıktır. Atmosferde buna neden olan parçacıkların boyutuna göre üç tür saçılma mevcuttur.

Rayleigh saçılması, yayılan elektromanyetik ışımanın dalgaboyundan daha küçük hava molekülleri ile etkileşime girerek saçılmaya uğraması ile oluşur (Garlinska ve diğ., 2020). Atmosferin mavi renk olmasının sebebi Rayleigh saçılmasıdır. Mie saçılması ise yayılan elektromanyetik ışımanın dalgaboyu ile aynı boyuttaki hava moleküllerinin etkileşime girmesi ile oluşur (Garlinska ve diğ., 2020). Mie saçılmasının en büyük nedeni aerosoller olduğu için alt atmosferde görülür. Seçici olmayan (non-selective) saçılma, hava molekülleri ya da parçacıkların yayılan elektromanyetik ışımanın dalgaboyundan çok daha büyük olduğunda meydana gelir bu nedenle seçici olmayan saçılma dalgaboyundan bağımsızdır (Garlinska ve diğ., 2020). Su damlacıkları veya daha büyük toz parçacıkları bu saçılmayı oluşturur. Bulutların beyaz görünmesinin nedeni bu saçılmadır, çünkü bulut su damlacıklarından oluşur ve her dalga boyundaki ışığı eşit olarak dağıtır.

2.2. Atmosferik Türbülans

Latince “Turba” kelimesi kalabalık anlamına gelmektedir. Orta çağda bu kelime büyük insan gruplarının düzensiz hareketlerini ifade etmekte kullanılmıştır. Leonardo Da Vinci bu kelimeyi ilk kez sıvıların rastgele hareketlerini açıklamakta kullanmıştır ,(Farge, 2022). Bu kavram 20. yüzyılda katılar ve dengeden uzak durumlarını da ifade edebilecek şekilde genelleştirilmiştir. Türbülans günümüzde birbiriyle etkileşim halinde olan düzensiz fiziksel hareketleri tanımlamak için kullanılmaktadır. Hem zamansal hem de uzaysal düzensizlikler/dağılmalar türbülans ile ifade edilebilmektedir.

Atmosferik türbülans, atmosferdeki hava hareketlerinin neden olduğu optik bozulmaların bir sonucudur. Şekil 2.3’de görüldüğü gibi bu fenomen (Jin ve diğ., 2021), gözlemcilerin uzaktaki nesneleri veya astronomik cisimleri bulanık, dalgalı veya hareketli şekilde görmesine neden olur.



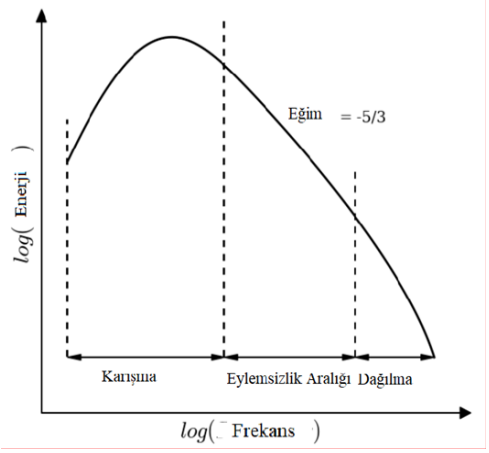
Şekil 2.3. Elektro-optik detektör üzerinde türbülans etkisi (Jin ve diğ., 2021).

Atmosferik türbülans, atmosferdeki değişken hava koşulları, sıcaklık gradyanları ve rüzgar hareketleri gibi faktörlerin etkileşimiyle ortaya çıkar. Bu etkileşimler ışığın atmosferdeki farklı yoğunluk ve sıcaklık katmanlarından geçerken kırılmasına ve kırıldıktan sonra da dalgalanmasına yol açar. Gözlemci bu dalgalanmaları gözlemlediğinde nesnelerin bulanık, dalgalı veya hareketli olduğunu fark eder. Özellikle astronomi, havacılık, uzaktan algılama, teleskopik gözlem, askeri keşif gözetleme sistemleri gibi alanlar bu problemle karşılaşmaktadır (Osborn ve diğ., 2015, Richardson ve diğ., 2006). Araştırmacılar, atmosferik türbülansın etkilerini azaltmak veya düzeltmek için çeşitli yöntemler geliştirmişlerdir (Zhu ve Milanfar, 2012, Tyson, 1990). Bunlar

arasında adaptif optik sistemler, görüntü işleme algoritmaları ve atmosferik koşulları izleme ve tahmin etme teknikleri bulunur. Bu şekilde fiziksel veya dijital olarak türbülans etkileri azaltılabilir.

2.3. Atmosferik Türbülans Tahmin Modelleri

Atmosferik türbülansı tam olarak açıklayan kesin bir teori henüz bulunmamaktadır. Bununla birlikte, atmosferik türbülansın doğasını anlamak ve etkilerini açıklamak için çeşitli teoriler ve modeller geliştirilmiştir (Birnir, 2013, Wei ve Willmarth, 1989, Zaman ve diğ., 1981). Geliştirilen uygulamalarda yaygın olarak Kolmogorov Teorisi (Birnir, 2013), Taylor Hipotezi (Zaman ve diğ., 1981), Reynolds Ortalamaları (Wei ve Willmarth, 1989) kullanılmaktadır. Kolmogorov tarafından 1941 yılında ortaya konan model türbülansın istatiksel özelliklerini açıklamaya çalışır. Kolmogorov teorisi, türbülansın enerji spektrumunu ve ölçeklemelerini ele alır ve küçük ölçekli türbülans yapısının büyük ölçekli yapılara nasıl evirildiğini açıklar (Birnir, 2013). Teorinin ana varsayımlarından biri türbülansın istatiksel olarak homojen ve izotropik olduğudur. Yani türbülanslı akışın istatiksel özellikleri uzaysal konumdan bağımsızdır ve akışı herhangi bir yönde aynıdır. Bu varsayım, türbülansın daha basit bir şekilde analiz edilmesine olanak sağlar. Kolmogorov teorisi, türbülansın enerji spektrumunu açıklamak için "Kolmogorov Enerji Spektrumu"nu kullanır (Şekil 2.4).



Şekil 2.4. Kolmogorov enerji spektrumu (Birnir, 2013).

Bu spektrum, türbülansın farklı ölçeklerindeki enerji dağılımını ifade eder. Bu enerji spektrumuna göre küçük ölçeklerde daha fazla enerji bulunurken büyük ölçeklerde daha az enerji bulunur. Dalga sayısı k ile enerji yoğunluğu arasındaki ilişki k (-5/3) şeklinde

ifade edilir. Kolmogorov Teorisi, türbülansın karmaşık doğasını basitleştirilmiş bir şekilde açıklamaya çalışır ve türbülansın enerji dağılımını ve ölçeklenme özelliklerini tanımlar. Ancak gerçek türbülans akışları oldukça karmaşık olduğundan, Kolmogorov Teorisi sadece bir idealizasyon ve sınırlamalar içerir. Gerçek dünyadaki türbülans olaylarını tam olarak açıklayamaz.

Taylor hipotezi, türbülansın uzaysal ölçekler arasında ölçek değişmezliğinin olduğunu öne süren bir hipotezdir. G.I. Taylor tarafından ortaya atılmıştır (Taylor, 1938). Bu hipoteze göre enerji transferinin sürekli bir şekilde gerçekleştiği yerlerde türbülansın temel istatiksel özellikleri ölçeklere bağlı olmadan aynı kalır. Bu, türbülanslı bir akışın farklı ölçeklerinde gözlem yapılsa bile, türbülansın temel istatiksel yapılarının yani hız, basınç gibi akış değişkenlerinin benzerlik göstereceği anlamına gelir (Zaman ve diğ., 1981). Bu hipotezde enerji transferinin durduğu veya kesildiği yerlerde, türbülansın ölçek değişmezliğinin geçerli olmayabileceği kabul edilir.

Taylor Hipotezi, türbülansın evrensel özelliklerini açıklamaya yöneliktir, türbülanslı akışın farklı ölçeklerindeki yapılar arasındaki ilişkiyi anlamak ve türbülansın genel davranışını tanımlamak için önemli bir araç olarak kullanılmakla birlikte tam anlamıyla kanıtlanmamış bir hipotezdir.

Reynolds ortalamaları yöntemi, bir akışın zaman ortalamalarını ve dalgalanmalarını analiz etmek için kullanılan bir yaklaşımdır (Wei ve Willmarth, 1989). Atmosferik türbülansı incelemek için, hava akımının hız, basınç ve diğer değişkenlerinin zaman içindeki ortalama değerlerini ve dalgalanmalarını analiz etmek önemlidir. Reynolds Ortalamaları, bir akış değişkeninin zaman ortalaması ve dalgalanması arasında bir ayrım yapar. Bu yöntemde hızın Reynolds ortalaması (u) akışın ortalama hızını temsil ederken, hızın dalgalanması (u') ise akıştaki hız değişimlerini ve dalgalanmalarını temsil eder. Bir değişkenin zaman ortalaması U ile temsil edilir ve hız dalgalanmaları u' = u - U ile hesaplanır (Wei ve Willmarth, 1989).

Reynolds ortalamaları yöntemi, türbülanslı akışların istatistiksel analizinde yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir ve türbülansın ortalama davranışını, dalgalanmalarını anlamak için kullanılır. Ancak, Reynolds Ortalamaları yöntemi, zaman ortalamalarını alırken bazı önemli bilgilerin kaybolabileceği bir yaklaşımdır.

Dalga yayılımı üzerindeki türbülans etkilerinin teorik yaklaşımları genellikle kırılma indisi yapı fonksiyonu cinsinden (Clifford, 1978),

$$\overline{[n(x,t) - n(x+r,t]^2} \equiv \overline{(n - n')^2} \tag{2.1}$$

şeklinde verilir. Burada n ve n' ; sırasıyla x noktasında ve $x + r$ noktasında dalgalanan kırılma indisidir. Birçok dalga yayılım problemi bu yapı fonksiyonundaki $r = |r|$ aralığını içerir ve kırılma indisi yapı parametresi (Wyngaard ve Lemone, 1980),

$$\overline{(n - n')^2} = C^2 r^{2/3} \tag{2.2}$$

şeklindedir. Buradaki C_n^2 atmosferin kırıcılık şiddetinin bir ölçüsü olarak değerlendirilir (Jassim ve diğ., 2015).

Sadot-Kopeika modeli olarak bilinen ve 1992 yılında gerçekleştirilen çalışmada meteorolojik ölçümler yapılarak atmosferik türbülans tahmini yapılabileceği ortaya konmuş ve iki adet ampirik model geliştirilmiştir (Sadot ve Kopeika, 1992). Geliştirilen modellerden birisi pratik kullanım diğeri ise daha karmaşık ve fazla parametre içeren biçimdedir. Sadot-Kopeika modeli atmosferik türbülans tahmini için ölçülmesi/belirlenmesi zor olan mikrometeorolojik parametreler yerine makrometeorolojik parametreleri kullanarak tahmin yapmaktadır. Ayrıca ele alınan makrometeorolojik parametreler, bulunulan çevrenin etkilerini de içermektedir.

Sadot-Kopeika modeli çeşitli çalışmalarda uygulanmış ve ölçüm sonuçlarıyla uyumlu olduğu gözlenmiştir (Hudcova ve Wilfert, 2017). Genellikle tercih edilmesinin nedeni, kolay elde edilebilir meteorolojik verilerin kullanımına dayanıyor olmasıdır. Bu tez çalışmasında da atmosferik türbülans tahmini için bu model kullanılmıştır.

2.4. Elektro-Optik Keşif Gözetleme Sistemleri

Elektro-optik keşif gözetleme sistemleri, günümüzde önemi giderek artarak kullanımı yaygınlaşan sistemlerdir. Kullanım amacına göre hangi dalga boyunda algılama yapılacaksa o dalga boyuna cevap verebilecek materyaller ihtiva eden detektörler kullanılarak üretilmektedirler. Elektro-optik keşif gözetleme sistemleri genellikle;

dalgaboyu 0,3-0,7 um aralığında görünür (VISIBLE) bantta, 1-3 um aralığında kısa dalgaboylu kızılötesi (short wave infrared-SWIR) bantta, 3-5 um aralığında orta dalgaboylu kızılötesi (mid wave infrared- MWIR) bantta ve 8-12 um aralığında uzun dalgaboylu kızılötesi (long wave infrared, LWIR) bantta algılama yapmaktadırlar.

Görünür bant dedektörler gündüz şartlarında iyi hava koşullarında yüksek performans sağlar. Ucuz olmaları, dedektörü soğutma ihtiyacı bulunmaması, yüksek çözünürlük sağlaması gibi nedenler ile tercih edilmektedirler. Gece ve kötü hava şartlarında performansları kötüdür.

SWIR bant dedektörler, genellikle Germanyum (Ge), InGaAs (İndiyum galyum arsenit), InSb (İndiyum antimonid), MCT (Cıva kadmiyum tellurid) gibi çeşitlere sahiptir. Gündüz şartlarında, iyi hava koşullarında, sis, pus, duman gibi şartlar altında iyi performans sağlar (Driggers ve diğ., 2013). Gece şartlarında performansı kötüdür. Gece uygulamaları için MWIR ve LWIR bant dedektörler daha uygundur. S

oğutmalı ve soğutmasız dedektör çeşitleri bulunmakla birlikte soğutmalı dedektörlerin hassasiyeti daha yüksektir. MWIR bant nemden daha az etkilenmektedir, bu nedenle deniz ortamında kullanımı LWIR banda göre daha yaygındır. LWIR bandın ise kara uygulamalarında kullanımı yaygındır. Elektro-optik keşif gözetleme sistemlerinin en yaygın kullanım alanı güvenlik/askeri uygulamalardır. Bunun yanında haritacılık, astronomi, tıp gibi birçok alanda da uygulamaları bulunmaktadır (Künzner ve diğ., 2010, Lahiri, 2012).

Elektro-optik keşif gözetleme sistemleri genellikle gece-gündüz durumunda değişen ışık durumu, hava şartları ve kullanım amacına göre optik tayfı kapatacak şekilde farklı dalgaboylarına duyarlı birden çok sensörün bir araya getirilmesi ile oluşur. Bu sayede bir elektro-optik keşif gözetleme sistemi (bkz. Şekil 2.5) değişen hava ve ışık koşullarından minimum seviyede etkilenerek çalışmaya devam edebilir.

Elektro-optik keşif gözetleme sistemlerinden elde edilecek performans ve verim böylece en üst seviyeye çıkarak kullanıcılara her türlü ortam şartında yüksek farkındalık sağlamaktadır.

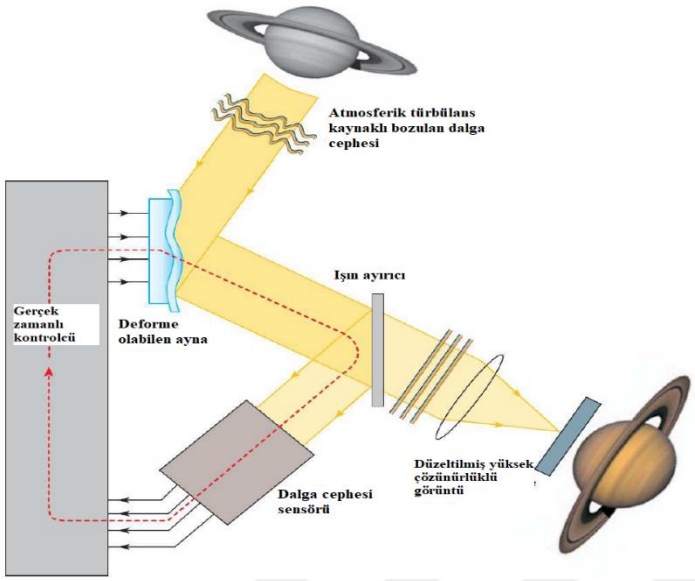


Şekil 2.5. Elektro-optik keşif gözetleme sistemi (Gupta, 2008).

Elektro-optik keşif gözetleme sistemlerinin en büyük avantajı, pasif algılama yaparak bakılan sektördeki hedeften yayılan enerjiyi algılayabilmesidir (Whiteman, 2000). Bu nedenle hedef, bir elektro-optik keşif gözetleme sistemi tarafından izlendiğini fark edememektedir. Askeri uygulamalarda bu kadar yaygın olarak kullanılmasının nedeni de budur. Radar gibi aktif sinyal göndererek hedeften geri yansıyan sinyalleri algılama prensibi üzerine çalışan sistemler, hedef tarafından fark edilebilir (Ci-yin ve diğ., 2010). Ayrıca elektro-optik keşif gözetleme sistemleri; içerisinde bulunan sensörler hedeften gelen enerjiyi elektrik sinyaline dönüştürebildiği için, radyometrik özelliği bulunan kızılötesi kameralarla bir hedeften gelen kızılötesi iz ölçümü de yapılabilmektedir (Dudzik, 1993).

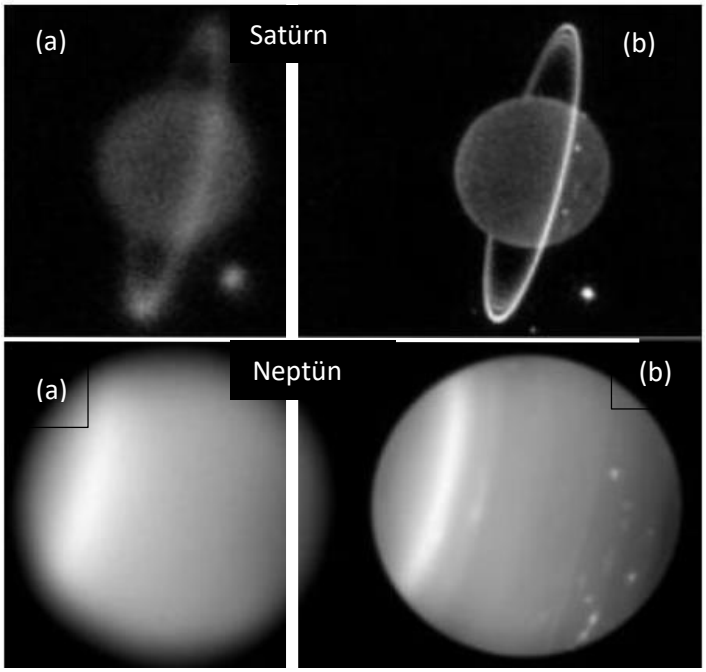
Elektro-optik keşif gözetleme sistemlerinin performansını olumsuz etkileyen parametreler mevcuttur. Optik kusurlar, ortamdaki ışık miktarı, atmosferik koşullar ve bu nedenle elektromanyetik dalgalarda oluşan bozulmalar vb. gibi etkenler bu sistemleri olumsuz etkilemektedir (Davies ve Kasper, 2012).

Bozulan dalga demetini düzeltmek için adaptif optik sistemler kullanılır. Tipik olarak bir adaptif optik sistemi üç bileşenden meydana gelir. Bu bileşenler; dalga cephesi sapmalarını ölçebilen dalga cephesi sensörü, bozulmuş optik dalgayı değiştirebilmek için şekil değiştirebilen ayna ve deforme edilebilir aynanın bozulmuş dalga cephesi şeklini alabilmesi ve uygun şekli hesaplayarak dalga cephesi sensörüne iletebilmesi için gerçek zamanlı kontrol yazılımı olarak tanımlanabilir (Tyson, 1990). Örnek bir adaptif optik düzeneği Şekil 2.6'da gösterilmiştir.



Şekil 1.6. Adaptif optik sistemi (Dinstein ve diğ., 1988).

Bu üç bileşenin çalışma prensibi kapalı döngü esasına dayanır. Bir adaptif optik sistem kullanılıp dalga demetinin düzeltilmesi sonucu elde edilen sonuçlara örnek olarak Neptün ve Satürn'e ait görüntüler Şekil 2.7'de verilmiştir (Charnotskii, 2021). Şekil 2.7 (a)'da gezegenlerin adaptif optiksiz kamera görüntüleri ve Şekil 2.7 (b)'de adaptif optikli kamera görüntüleri görülmektedir.



Şekil 2.7. Satürn ve Neptün gezegenlerine ait (a) adaptif optiksiz ve (b) adaptif optikli kamera görüntüleri (Charnotskii, 2021).

3. DENİZ ORTAMINDA ATMOSFERİK TÜRBÜLANS ÖLÇÜM VE TAHMİNLERİ

Atmosferik türbülans, optik türbülans olarak da bilinen atmosferin kırıcılık indisindeki dalgalanmalar olarak adlandırılır. Kırıcılık indisi değişimine neden olan bu faktörler atmosferde yaşanan değişimlerdir (Xu, 2021). Sıcaklık, nem, rüzgar şiddeti, basınç, havadaki gaz karışımının içeriği, havada asılı kalan aerosoller gibi parametrelerin değişimiyle birlikte atmosferin kırıcılık indisinde de değişimler meydana gelmektedir. Atmosferik türbülans nedeniyle oluşan kırıcılık indisi değişimleri küçüktür ancak atmosferik yol uzadıkça atmosfer içerisinde ilerleyen dalga üzerinde kümülatif olarak büyüyerek bozucu bir etkiye yol açar. Atmosferin kırıcılık şiddetinin bir ölçüsü C_n^2 ile verilir (Jassim ve diğerleri, 2015).” C_n^2 “bir dönüşüm sabiti olmakla birlikte “n” kırılma indisini ifade eder (Wyngaard ve Lemone, 1980). Genellikle zayıf türbülans koşulları için $C_n^2 = 10^{-16} m^{-2/3}$ veya daha küçük değerler alırken güçlü türbülans koşulları için $C_n^2 = 10^{-12} m^{-2/3}$ veya daha büyük değerler alır (Tunick, 2005).

Bu tez çalışması kapsamında deniz ortamında atmosferik türbülansın elektro-optik keşif görüntüleme sistemleri üzerindeki etkisini incelemek amacıyla; Tuzla bölgesinde 2023 yılının farklı mevsimlerine ait meteorolojik veriler toplandı, aynı sahada eş zamanlı olarak atmosferik türbülans ölçümleri (C_n^2) gerçekleştirilerek kamera görüntüleri alındı. Sahada toplanan verilerle atmosferik türbülans tahminleri de yapılarak türbülansın yol açtığı performans kayıplarına yönelik olarak gerçekleştirilen analizlerle elektro-optik keşif gözetleme sistemleri üzerindeki etkileri incelendi. Tezin bu bölümde deneysel çalışmalarda kullanılan materyaller, uygulanan deneysel yöntemler, kullanılan hesaplama yöntemleri verilmiştir. Deneysel çalışmalarda elde edilen atmosferik türbülans ölçümleri ve hesaplanan atmosferik türbülans tahminleri de bu bölümde sunulmuş ve irdelenmiştir.

3.1. Deneysel Çalışmalarda Kullanılan Ölçüm Cihazları

Tez kapsamında gerçekleştirilen deneysel çalışmalarda, atmosferik türbülans ölçer, SWIR kamera ve meteorolojik ölçüm sensörleri kullanılmıştır.

3.1.1. Atmosferik Türbülans Ölçer

Tez kapsamında gerçekleştirilen deneysel çalışmalarda, atmosferik türbülansı ölçmek

için Scintec BLS450 Scintillometer atmosferik türbülans ölçer cihazı kullanılmıştır. Bir alıcı ve bir vericiden oluşan 850 nm dalga boyunda elektromanyetik dalga yayan ve Şekil 3.1'de görülen bu Sintilometre, optik verici ile alıcı arasındaki türbülansı algılar. Çalışma prensibi, belirli bir mesafede hizalanarak yerleştirilmiş bir alıcı ve verici arasında bulunan atmosferik yoldaki kırılma indisi dalgalanmaları ile ışığın modülasyonuna dayanmaktadır. Bu fenomene sintilasyon denir ve yıldızların geceleri parıldamasının nedeni budur. Nokta sensörlü geleneksel türbülans ölçümleriyle karşılaştırıldığında sintilometreler, daha düşük istatistiksel dağılım ve daha kısa ortalama sürelerle mekânsal olarak temsili sonuçlar toplar (Dinstein ve diğ., 1988). Çift uçlu bir uzaktan algılama sistemi olan sintilometreler aynı zamanda orman veya su gibi arazilere yerinde sensör kurulumuna gerek kalmadan erişime de olanak tanır.



Şekil 3.1. Bir alıcı ve bir vericiden oluşan 850 nm dalga boyunda elektromanyetik dalga yayan Scintec BLS 450 türbülans ölçer.

3.1.2. SWIR Kamera

Atmosferik türbülans etkilerinin gözlenmesi için kısa dalga kızılötesi bölgede çalışan, Şekil 3.2'de gösterilen (SWIR) NIT WIDY SENS 640 kamera kullanılmıştır. SWIR

kamera 640x512 piksel çözünürlüklü InGaAs (İndiyum Galyum Arsenit) soğutmasız detektöre sahiptir. Algılama yapabildiği dalgaboyu aralığı 0,9 - 1,7 mikro metredir ve 500 milimetre lens ile 1 derece bakış açısı sağlar. Nesnenin kendisinden yayılan Orta Dalga Kızılötesi (MWIR) ve Uzun Dalga Kızılötesi (LWIR) ışığın aksine SWIR, fotonların bir nesne tarafından yansıtılması veya soğurulması açısından görünür ışığa benzerdir ve yüksek çözünürlüklü görüntü için gereken güçlü kontrastı sağlar. Ortamdaki yıldız ışığı ve arka plan parlaklığı (gece parlaması), SWIR için doğal yayıcılarıdır ve dış mekânda gece görüntüleme için mükemmel aydınlatma sağlar.



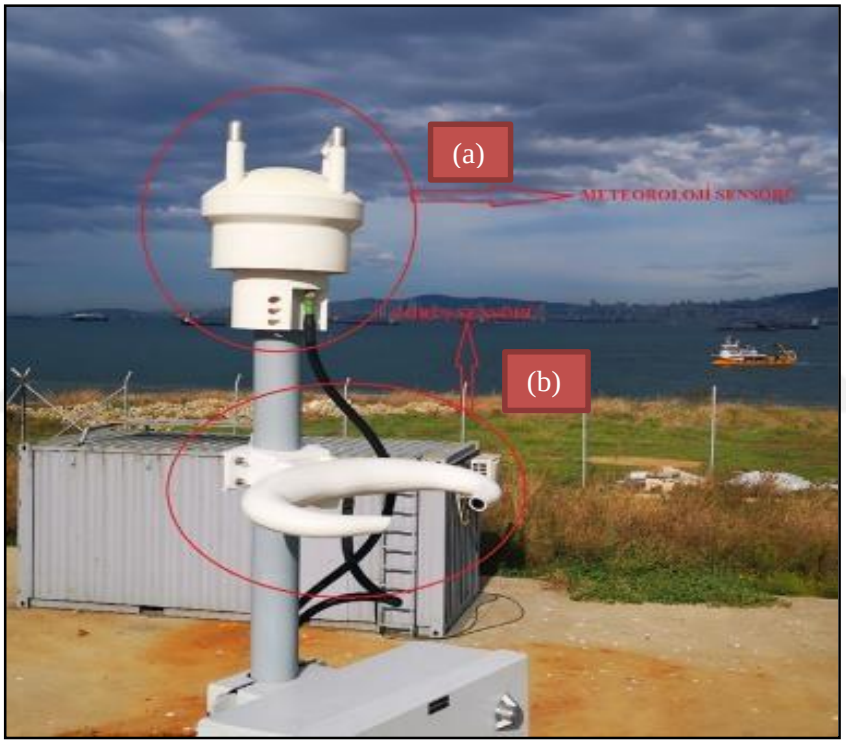
Şekil 3.2. Atmosferik türbülans etkilerinin gözlenmesi için kullanılan kısa dalga kızılötesi bölgede çalışan NIT WIDY SENS SWIR kamera.

Çalışmalarda kullanılan bu kamerada SWIR dalga boyu aralığı için tasarlanmış, optimize edilmiş, kaplanmış bir mercek yer almaktadır. Bu nedenle görünür ışık kullanılarak gerçekleştirilmesi zor veya imkânsız olan çok sayıda uygulama için kullanımı tercih edilir. Görüntüleme yaparken su buharı, sis ve silikon gibi bazı malzemeler şeffaftır. Ayrıca görünür bantta hemen hemen aynı görünen renkler, SWIR kullanılarak kolayca ayırt edilebilir. SWIR görüntüleme, elektronik kart denetimi, güneş pili denetimi, ürün denetimi, tanımlama ve sınıflandırma, gözetim, sahteciliğe karşı koruma, süreç kalite kontrolü ve çok daha fazlasını içeren çeşitli uygulamalarda kullanılır.

3.1.3. Meteorolojik Ölçüm Sensörleri

Meteorolojik ölçümler için Şekil 3.3'te gösterilen ORTANA METEOS 101 meteoroloji sensörü ve ORTANA METEOS 151 görüş sensörü kullanılmıştır. Meteoroloji istasyonu ile hava sıcaklığı, bağıl nem, yağış şiddeti, yağış türü, rüzgâr hızı, rüzgâr yönü ve hava basıncı parametre ölçümleri gerçekleştirilebilmektedir.

Görüş sensörü ile atmosferik görüş mesafesini optik örnekleme hacminin içinden geçen farklı partiküllerden (duman, sis, toz, pus, yağmur ve kar) ışığın saçılma miktarını değerlendirerek ölçebilmektedir.



Şekil 3.3. Meteoroloji sensörü (a), görüş sensörü (b).

3.2. Meteorolojik Veriler ve Atmosferik Türbülans Ölçümleri

Atmosferik türbülansın elektro-optik keşif görüntüleme sistemleri üzerindeki etkilerinin incelendiği bu tez kapsamında gerçekleştirilen çalışmalarda İstanbul/Tuzla'da bulunan Milli Savunma Üniversitesi Deniz Harp Okulu Yerleşkesi içerisindeki Sırttepe mevkiinde 2023 yılına ait dört farklı mevsimde, Ocak, Nisan, Temmuz, Ekim aylarında rastgele günlerde meteorolojik veriler toplanmış aynı zamanda 1.1 kilometre mesafede atmosferik türbülans ölçümleri yapılmış ve kısa dalga boyu kızılötesi kamera ile görüntü alınmıştır.

3.2.1. Meteorolojik Verilerin Toplanması

Yeryüzünün farklı bölgelerinde olduğu gibi yılın farklı mevsimlerinde de atmosferik türbülansın etkileri değişiklik gösterir. Ülkemizin Marmara bölgesinde bu etkilerin farklı mevsimlerde değişimini incelemek amacıyla 2023 yılının Ocak, Nisan, Temmuz ve Ekim aylarına yönelik 4 grup meteorolojik veri toplanmıştır. Meteorolojik veriler Bölüm 3.1'de özellikleri verilen ORTANA METEOS 101 meteoroloji sensörü ve ORTANA METEOS 151 görüş sensörü kullanılarak toplanmıştır.

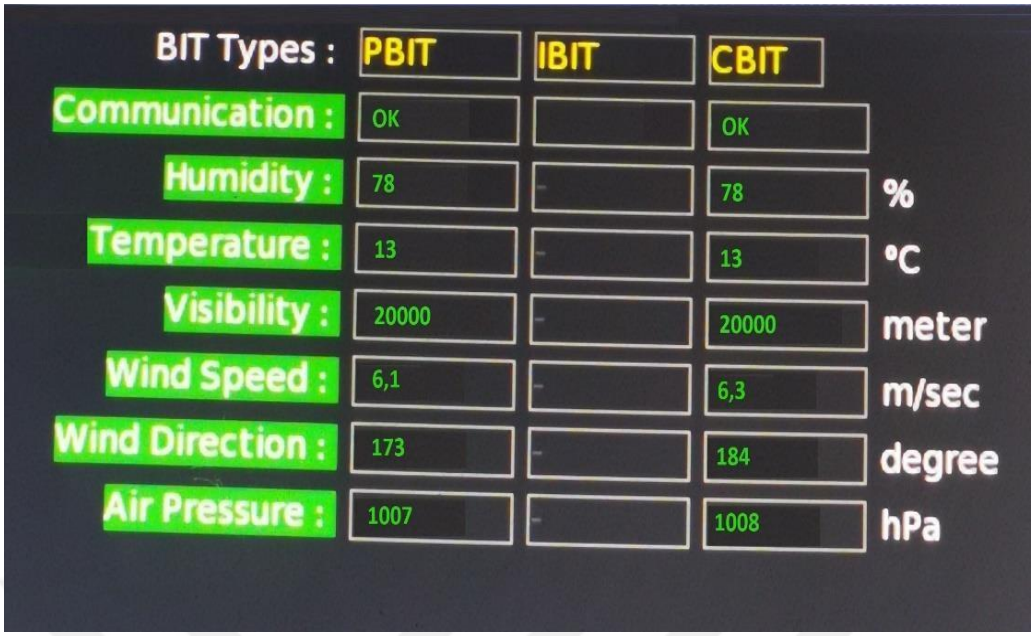
Hem meteorolojik hem de atmosferik veriler aynı gün ve aynı saat aralıklarında toplanmıştır. Verilerin toplandığı gün ve saat aralıkları Tablo 3.1'de verilmiştir. Veriler 11:00 ile 15:30 arasında öğlen saatlerine yaklaşık zaman dilimlerinde alınmıştır.

Tablo 3.1. Meteorolojik ve atmosferik verilerin ölçüldüğü zaman aralıkları.

Veri Kodu	Tarih	Saat Aralığı
OCA.23	27 Ocak 2023	14:02 -15:02
NİS.23	5 Nisan 2023	11:17-12:17
TEM.23	19 Temmuz 2023	13:34 - 14:34
EKİ.23	10 Ekim 2023	14:29 - 15:29

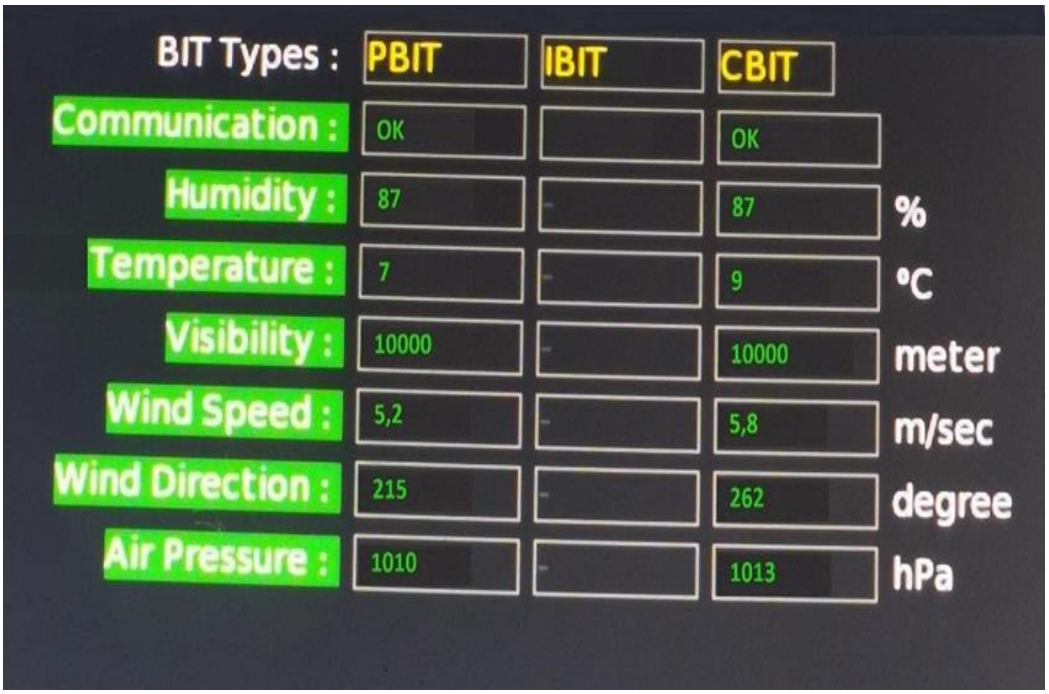
Şekil 3.4'te OCA.23 tarihinde alınan meteorolojik veriler görülmektedir. Şekilde gösterilen "PBIT", "IBIT" ve "CBIT" sütunları meteorolojik verilerin ekranda yenilenme zamanlarını göstermektedir. "PBIT" değerleri meteoroloji istasyonunun ilk aktif olduğu anda kullanıcıya sergilediği verilerdir. "IBIT" komut verilmesi durumunda herhangi bir anda o ana ait meteorolojik değerleri kullanıcıya sunan verilerdir. "CBIT" belirlenen periyotlarla otomatik olarak meteorolojik değerleri güncelleyerek sergileyen verilerdir.

Analizler esnasında "CBIT" sütununda bulunan ve dakikada bir güncellenen değerler kullanılmıştır. Şekil 3.4'deki "Communication" satırı meteoroloji istasyonu ile bilgisayar arasında bulunan bağlantının durumunu, "Humidity" yüzde cinsinden bağıl nemi, "Temperature" santigrat cinsinden hava sıcaklığını, "Visibility" metre cinsinden optik görüş mesafesini, "Wind Speed" metre/saniye cinsinden rüzgâr hızını, "Wind Direction" derece cinsinden rüzgar yönünü ve "Air Pressure" hekto paskal cinsinden açık hava basıncını göstermektedir.

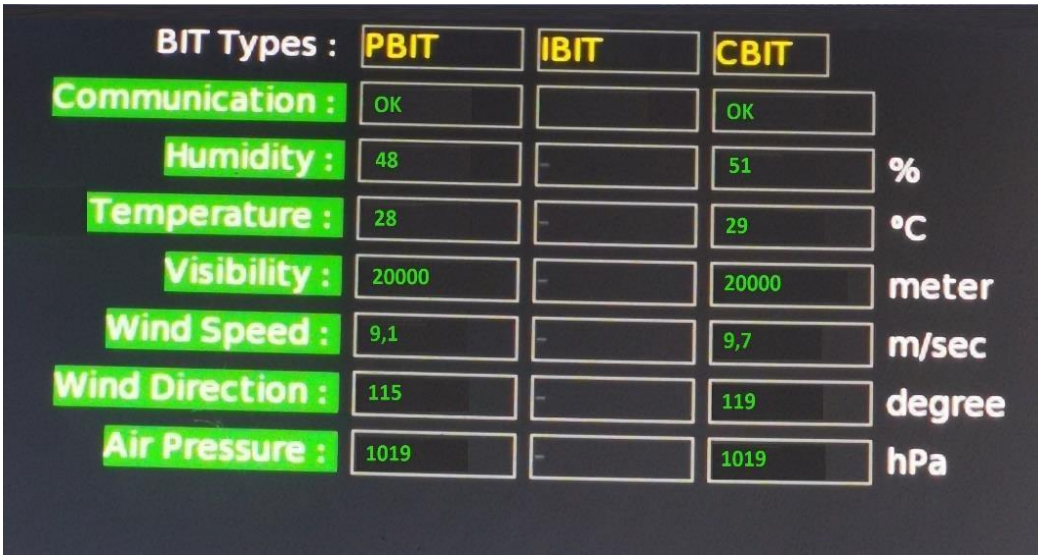


Şekil 3.4. OCA.23 tarihli meteorolojik veriler.

Şekil 3.5'te NİS.23 tarihinde alınan meteorolojik veriler görülmektedir. Şekil 3.6'da TEM.23 tarihinde alınan meteorolojik veriler görülmektedir. Şekil 3.7'de EKİ.23 tarihinde alınan meteorolojik veriler görülmektedir. Elde edilen bu veriler, atmosferik türbülans tahmini hesaplamalarında kullanılmıştır.



Şekil 3.5. NİS.23 tarihli meteorolojik veriler.



Şekil 3.6. TEM.23 tarihli meteorolojik veriler.



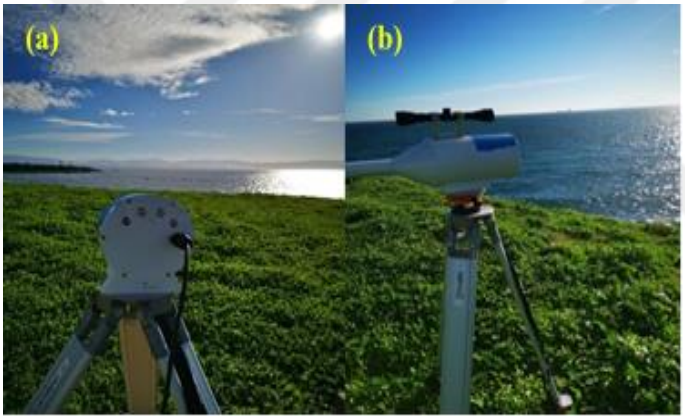
Şekil 3.7. EKİ.23 tarihli meteorolojik veriler.

3.2.2. Atmosferik Türbülans Ölçümleri

Atmosferik türbülans ölçümleri, İstanbul'un Tuzla ilçesi Sırttepe mevkiinde yaklaşık 1100 metre mesafede ve deniz yüzeyinden yaklaşık 10 metre yüksekliğe yerleştirilen türbülans alıcı/verici birimleri ile meteorolojik ölçümlerin yapıldığı tarih ve zaman aralıklarında türbülans ölçümleri yapılmıştır. Ölçümler esnasında dakikada altı adet kayıt alma hızı ile veriler kaydedilmiştir. Şekil 3.8'de türbülans ölçer cihazın alıcı ve vericisinin harita üzerinde yerleşimi gösterilmiştir. Türbülans ölçer alıcısı, meteoroloji istasyonu ve SWIR kamera aynı konuma yerleştirilmiştir. Şekil 3.9'da alıcı ve verici birimlere ait arazi yerleşimi gösterilmiştir.



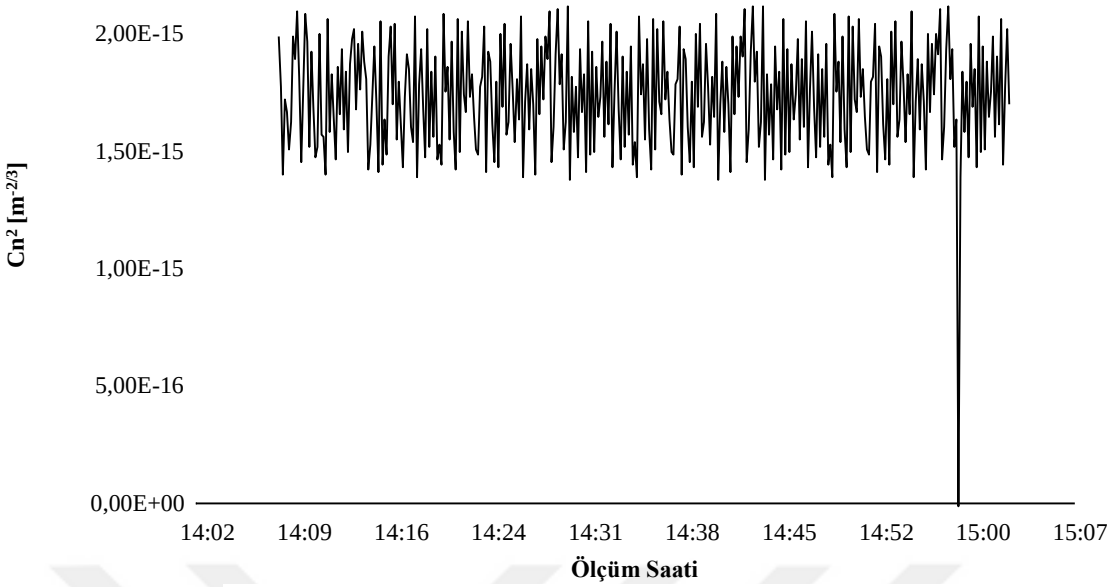
Şekil 3.8. Çalışma yapılan sahanın uydu görüntüsü.



Şekil 3.9. Türbülans ölçer vericisi (a) ve alıcısı (b) arazi yerleşimi.

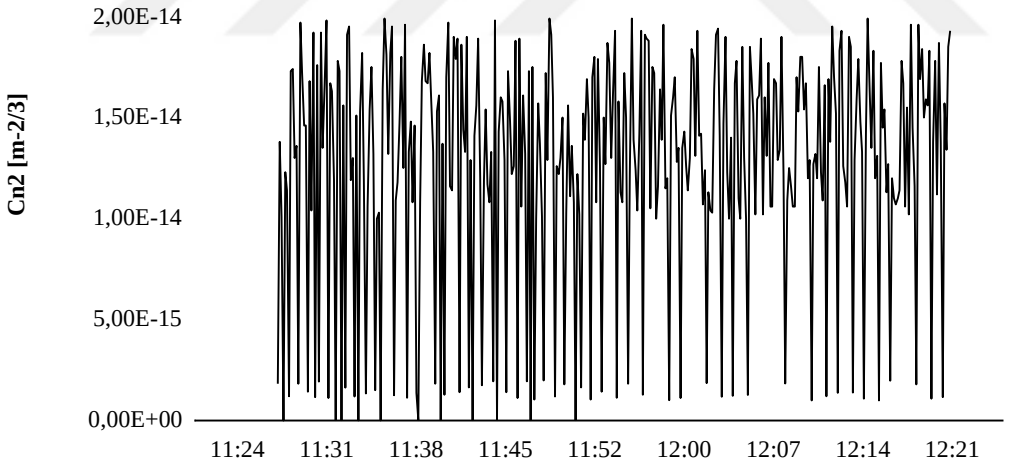
Gerçekleştirilen meteorolojik ölçümlere paralel olarak türbülans ölçümleri Tablo 3.1'de verilen aynı gün ve saat aralıklarında gerçekleştirildi. Atmosferik türbülans ölçümleri; bir atmosferik türbülans parametresi olan C_n^2 $m^{-2/3}$ kırıcılık indisi birimlerinde gerçekleştirildi.

OCA.23 tarihinde kayıt altına alınan türbülans ölçüm sonuçları Şekil 3.10'da görülmektedir. Ölçülen atmosferik türbülans verileri 1,93 x 10^{-15} $m^{-2/3}$ ile 1,30 x 10^{-15} $m^{-2/3}$ aralığındadır, bu 360 verinin aritmetik ortalaması alındığında C_n^2 değeri yaklaşık olarak 1,63 x 10^{-15} $m^{-2/3}$ elde edildi. Genellikle zayıf türbülans koşulları için $C_n^2 = 10^{-16} m^{-2/3}$ veya daha küçük değerler alırken, güçlü türbülans koşulları için $C_n^2 = 10^{-12} m^{-2/3}$ veya daha büyük değerler alır (Tunick, 1998). Bu bağlamda değerlendirildiğinde bu değer zayıf-orta şiddetli türbülans olarak kabul edilebilir.



Şekil 3.10. OCA.23 tarihli ölçülen C_n^2 değerleri.

NIS.23 tarihinde kayıt altına alınan türbülans ölçüm sonuçları Şekil 3.11'de görülmektedir. Ölçülen atmosferik türbülans verileri 2,1 x 10^{-14} $m^{-2/3}$ ile 0,2 x 10^{-14} $m^{-2/3}$ aralığındadır, bu 360 verinin aritmetik ortalaması alındığında C_n^2 değeri yaklaşık olarak 1,25 x 10^{-14} $m^{-2/3}$ elde edildi ve bu değer orta şiddetli türbülans olarak edilebilir.

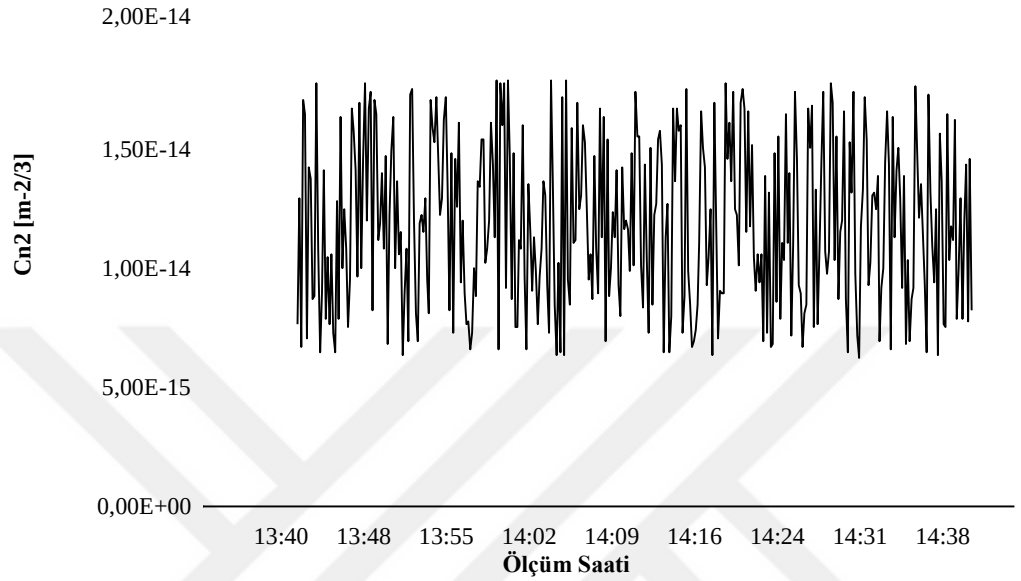


Şekil 3.11. NIS.23 tarihli ölçülen C_n^2 değerleri.

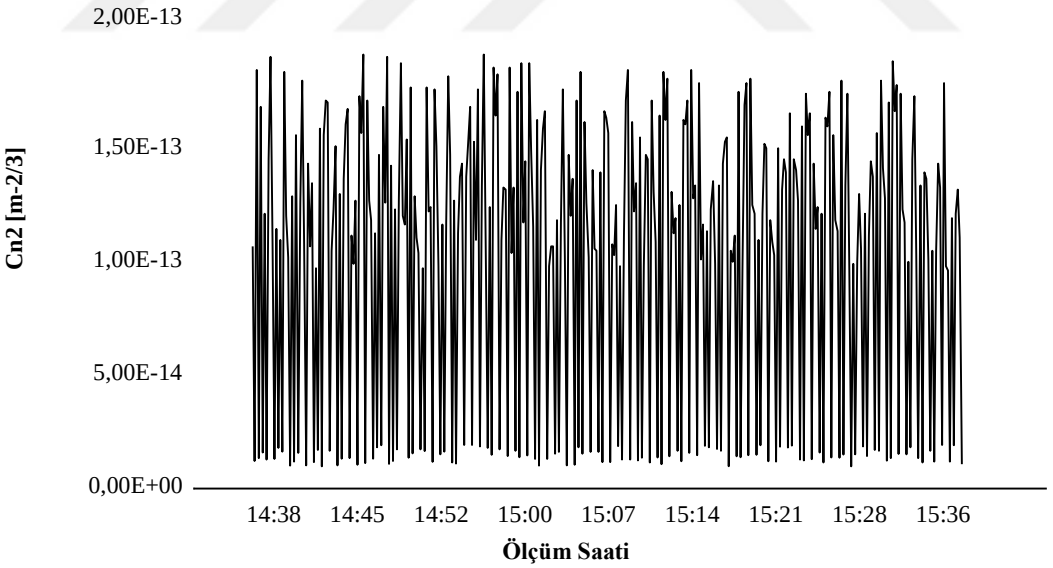
TEM.23 tarihinde kayıt altına alınan türbülans ölçüm sonuçları Şekil 3.12'de görülmektedir. Ölçülen atmosferik türbülans verileri 2,1 x 10^{-15} $m^{-2/3}$ ile 1,1 x 10^{-14} $m^{-2/3}$ aralığındadır, bu 360 verinin aritmetik ortalaması alındığında C_n^2 değeri yaklaşık olarak 1,48 x 10^{-14} $m^{-2/3}$ elde edildi ve bu değer orta şiddetli türbülans olarak edilebilir.

EKİ.23 tarihinde kayıt altına alınan türbülans ölçüm sonuçları Şekil 3.13'de

görülmektedir. Ölçülen atmosferik türbülans verileri 1,93 x 10^{-13} $m^{-2/3}$ ile 0,3 x 10^{-13} $m^{-2/3}$ aralığındadır, bu 360 verinin aritmetik ortalaması alındığında C_n^2 değeri yaklaşık olarak 1,04 x 10^{-13} $m^{-2/3}$ elde edildi ve bu değer orta-yüksek şiddetli türbülans olarak edilebilir bir değerdir.



Şekil 3.12. TEM.23 tarihli ölçülen C_n^2 değerleri.



Şekil 3.13. EKİ.23 tarihli ölçülen C_n^2 değerleri

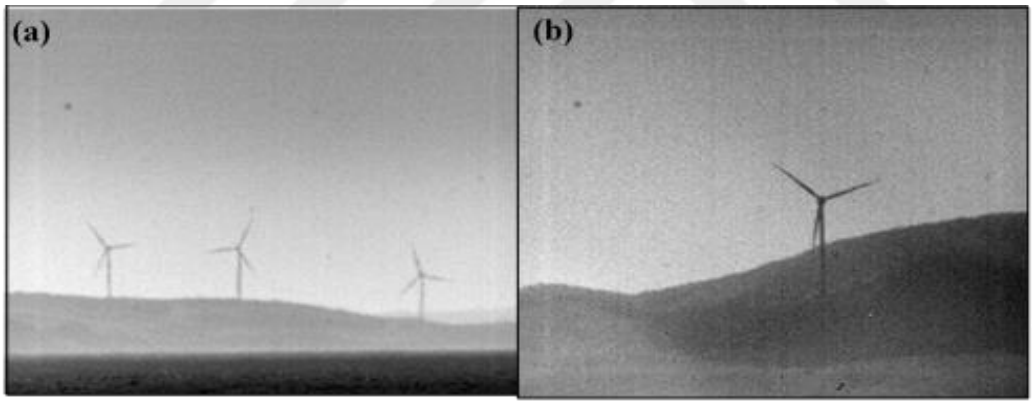
3.2.3. SWIR Kamera Görüntüleri

Meteorolojik ölçümler ve atmosferik türbülans ölçümlerinin yapıldığı ve Tablo 3.1'de verilen zamanlarda aynı mevkide, türbülans ölçümlerinin yapıldığı dalga boyunu da

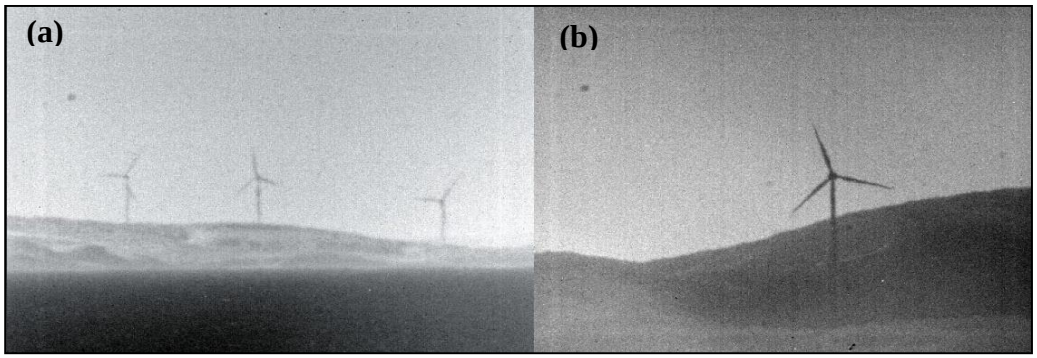
kapsayacak şekilde görüntü toplayan kısa dalga boylu kızılötesi SWIR kamera ile 20 km ve 30 km mesafelerde bulunan rüzgar türbinlerine ait görüntüler toplanmıştır. Atmosferik türbülansın atmosferik yol boyunca oluşturduğu olumsuz etkilerin kümülatif bir şekilde artarak biriktiğinin daha iyi anlaşılması açısından bu uzun mesafeler seçilmiştir.

Şekil 3.14'te OCA.23 tarihinde zayıf-orta şiddet türbülansta kayıt altına alınan SWIR kamera görüntüleri, Şekil 3.15'de TEM.23 tarihinde orta şiddet türbülansta kayıt altına alınan SWIR kamera görüntüleri ve Şekil 3.16'da EKİ.23 tarihinde orta-yüksek türbülansta kayıt altına alınan SWIR kamera görüntüleri verilmiştir. Her üç şekilde de (a)'da referans rüzgar türbinlerinin 30 km mesafede, (b)'de de 20 km mesafede kamera görüntüleri yer almaktadır.

NİS.23 tarihinde yapılan deneysel çalışmalarda atmosferik görüş mesafesi 10 km ve altına düştüğü için 20 km ve 30 km mesafelerde bulunan referans rüzgâr türbinlerinin görüntüleri elde edilememiştir.

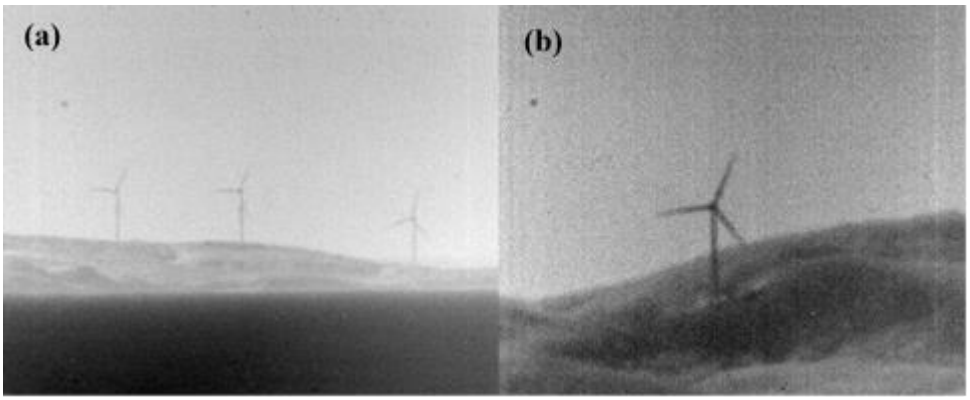


Şekil 3.14. OCA.23 tarihli zayıf-orta şiddet türbülansta **(a)** 30 km ve **(b)** 20 km mesafelerde elde edilen SWIR kamera görüntüleri.



Şekil 3.15. TEM.23 tarihli orta şiddetli türbülansta **(a)** 30 km ve **(b)** 20 km mesafelerde

elde edilen SWIR kamera görüntüleri.



Şekil 3.16. EKİ.23 tarihli orta-yüksek şiddetli türbülansta **(a)** 30 km ve **(b)** 20 km mesafelerde elde edilen SWIR kamera görüntüleri.

3.3. Atmosferik Türbülans Tahmini

Tez çalışmasının bu bölümünde, yılın farklı mevsimlerinde ölçülen atmosferik veriler kullanılarak Sadot – Kopeika ampirik modeli yardımıyla hesaplanan atmosferik türbülans tahmin sonuçları verilmiştir.

3.3.1. Sadot-Kopeika Ampirik Modeli

Atmosferik türbülans, elektro-optik sistemlerin görüntüleri üzerinde olumsuz etkiler yaratmaktadır. Atmosferik türbülansın ölçülmesi zor olmakla birlikte elektro-optik sistemlerin performanslarının belirlenmesini zorlaştırmaktadır. Bu durum atmosferik türbülans tahmini ihtiyacını ortaya çıkarmıştır. 1988'de Dinstein, H. Zoabi, and N. S. Kopeika (Dinstein ve diğ., 1988), 1990'da Kopeika, Kogan, Israeli, Dinstein (Kopeika ve diğ., 1990) ve 1992 yılında Dan Sadot ve Norman Kopeika tarafından yapılan çalışmalar (Sadot ve Kopeika, 1992) neticesinde meteorolojik ölçümler yapılarak atmosferik türbülans tahmini yapılabileceği ortaya konmuş ve iki adet ampirik model geliştirilmiştir. Geliştirilen modellerden birisi pratik kullanım diğeri ise daha karmaşık ve fazla parametre içeren biçimdedir. Sadot-Kopeika modeli atmosferik türbülans tahmini için ölçülmesi/belirlenmesi zor olan mikrometeorolojik parametreler yerine makrometeorolojik parametreleri kullanarak tahmin yapmaktadır. Ayrıca makrometeorolojik parametreler bulunulan çevreden de etkilenmektedir (Sadot ve Kopeika, 1992). Örneğin yoğun bitki örtüsüne sahip bir kırsal alanda fotosentez nedeniyle karbondioksit oranında ki azalma aynı zamanda su buharının atmosfere verilmesi ile bağıl

nem artışına yol açacak ve hava sıcaklığını etkileyecektir. Ya da bir çöl ortamındaki yüksek sıcaklıktaki çöl kumu havadaki nemi azaltacak ve sıcaklığı etkileyecektir. Dolayısıyla makro ölçekli yaklaşım, atmosferik verilerin yanı sıra çevresel etkileri de kapsamaktadır (Sadot ve Kopeika, 1992). Pratik model, standart hava tahminlerinde yer alan parametrelere dayanmaktadır. Pratik model kullanılarak tahmin edilen veri ile ölçülen veri arasında %90 oranında korelasyon bulunmaktadır. Karmaşık model ise standart parametrelere ek olarak güneş ışığı akısı, metreküp başına aerosol parçacıklarının oranı gibi parametreleri de ihtiva etmektedir (Sadot ve Kopeika, 1992).Bu tez çalışmasında Sadot-Kopeika modelinin seçilmesinin nedeni, bu modelin deniz ortamında atmosferik türbülans tahmini yaparken, deniz ortamının etkilerini de içerecek şekilde atmosferden alınan makro-meteorolojik parametreleri kullanması yani çevresel faktörleri ihtiva etmesi ve aynı zamanda kolay elde edilebilir temel meteorolojik parametreleri baz almasıdır.

Pratik ampirik modelde atmosferik türbülans katsayısı C_n^2;

$$C_n^2 = a_1 W + b_1 T + c_1 RH + c_2 RH^2 + c_3 RH^3 + d_1 WS + d_2 WS^2 + d_3 WS^3 + e \qquad (3.1)$$

ile hesaplanır ($m^{-2/3}$ birimlerinde). Burada W zamanın ağırlıklı katsayısını (bağıl ağırlık), T Kelvin cinsinden sıcaklık değerini, RH bağıl nemi, WS rüzgâr hızını ifade eder. Zamanın ağırlık katsayısı için değerler Tablo 3.2'de verilmiştir. Zamanın ağırlık katsayısı, gün doğumu ve gün batımı zamanlarını türbülans açısından zayıf, öğle saatlerini ise nispeten kuvvetli kabul eden bir katsayıdır. Eşitlik (3.1)'de yer alan a_1, b_1, c_1, c_2, c_3 d_1, d_2, d_3 ve e regresyon katsayılarıdır ve Tablo 3.3'de verilmiştir (Tunick, 1998, Trichili ve diğ., 2020).

Tablo 3.2. Modelde kullanılan zamanın ağırlık katsayıları (Sadot ve Kopeika, 1992).

Geçici Saat Aralığı (Temporal Hour-*TH*)	Bağıl Ağırlık (Relative Weight-*W*)
-4 e kadar	0.11
-3 ve -2 arası	0.11
-2 ve -1 arası	0.07
-1 ve 0 arası	0.08
0 ve 1 arası	0.06
1 ve 2 arası	0.05
2 ve 3 arası	0.10
3 ve 4 arası	0.51

Tablo 3.2 (Devam). Modelde kullanılan zamanın ağırlık katsayıları (Sadot ve Kopeika, 1992).

Geçici Saat Aralığı (Temporal Hour-*TH*)	Bağıl Ağırlık (Relative Weight-*W*)
4 ve 5 arası	0.75
5 ve 6 arası	0.95
6 ve 7 arası	1.00
7 ve 8 arası	0.90
8 ve 9 arası	0.80
9 ve 10 arası	0.59
10 ve 11 arası	0.32
11 ve 12 arası	0.22
12 ve 13 arası	0.08
13 ve üzeri	0.13

Atmosferik türbülans ile saat arasındaki ilişki incelendiğinde öğle saatlerinde türbülansın daha yüksek olduğu, gün doğumu ve gün batımına yakın daha düşük değerleri gösterdiği görülmüştür (Sadot ve Kopeika, 1992). Bu nedenle türbülans tahmininde, tahminin yapıldığı andaki güneşe bağlı zamanın etkisini hesaba katmak için gündoğum zamanı ile gün batım zamanı kullanılarak TP katsayısı (Glavas ve diğ., 2018);

$$TP = \frac{|t_{gündoğumu} - t_{günbatımı}|}{12} \tag{3.2}$$

ile elde edilir. Elde edilen bu katsayı ile zamanın ağırlık katsayısı W'nın belirlenmesinde kullanılan geçici saat aralığı TH;

$$TH = \frac{t - t_{gündoğumu}}{TP} \tag{3.3}$$

şeklinde hesaplanır [4]. Hesaplanan TH katsayısı ile Eşitlik (3.1)' de kullanılacak zamanın ağırlık katsayısı *W* değeri Tablo 3.1'den belirlenir.

Tablo 3. 3. Modelde kullanılan regresyon katsayıları (Sadot ve Kopeika, 1992).

a_1	3.8E-14
b_1	2.0E-15
c_1	-2.8E-15
c_2	2.9E-17
c_3	-1.1E-19
d_1	-2.5E-15
d_2	1.2E-15
d_3	-8.5E-17
e	-5.3E-13

Örneğin güneşin 08:00'de doğup 20:00 de battığı bir günde öğlen 12:00 da tahmin yaptığımızı varsayalım. Burada (08:00-20:00)/12 bize -1 olarak hesapladığımız TP parametresini verecektir. Daha sonra güneşin doğduğu saat olan 08:00'den tahmin etmek istediğimiz saat olan 12:00 den çıkarıp TP parametresi olan -1'e bölüp 4 olarak hesapladığımız Temporal Hour (TH) değerine ulaşırız. Zamanın ağırlık katsayısı tablosunda 4 satırına denk gelen bağıl ağırlığı (W) böylece bularak tahmin modeline yerleştirebiliriz.

3.3.2. Atmosferik Türbülans Tahmini

Atmosferik türbülans tahmini hesaplamalarında kullanmak üzere, yıl boyunca ölçüm yapılan ve Tablo 3.1'de verilen tarih aralıklarında toplanan meteorolojik veriler Tablo 3.4'te özetlenmiştir.

Tablo 3.4. Atmosferik türbülans tahmini hesaplamalarında kullanmak üzere toplanan meteorolojik veriler.

Tarih	Sıcaklık (^{0}C)	Nem (%)	Optik Görüş (km)	Basınç (hPa)	Rüzgar Hızı (m/s)	Rüzgar Yönü (^{0})
OCA.23	13	78	20 km	1008	6,3	184
NİS.23	7	87	10 km	1013	5,8	262
TEM.23	29	48	20 km	1019	9,7	119
EKİ.23	19	65	20 km	1024	9,9	92

Bu çalışmada atmosferik türbülans tahmini yapılırken zamanın ağırlık katsayısı (W) belirlemek için yıl boyunca ölçüm yapılan 4 gün için o günlere ait ölçüm yapılan saatlerin tam ortasındaki zamanlar alındı. Eşitlik (3.2) ve Eşitlik (3.3) kullanılarak hesaplanan TH değerlerine karşılık gelen bağıl ağırlık katsayıları belirlendi. Ölçtüğümüz meteorolojik veriler (Tablo 3.4), belirlenen W değerleri ve regresyon katsayıları kullanılarak atmosferik türbülans katsayısı (C_n^2) değerleri Eşitlik (3.2) kullanılarak hesaplandı.

OCA.23 tarihinde ölçülen atmosferik veriler kullanılarak yapılan atmosferik türbülans tahmini için gün doğum saati 08:17 ve gün batım saati 18:13 olarak alındı. Zamanın ağırlık katsayısını bulmak için gerçekleştirilen hesaplama sonucu güneş yaklaşık 10 saat boyunca ölçüm yapılan koordinatları aydınlatmıştır. Model yaklaşımına göre güneşin 10 saat aydınlattığı senaryoda türbülansın en yoğun olduğu saatler 5.ve 6. saatlerdir. Bu saatler yaklaşık 13:00 ve 14:00'a denk gelmektedir. Buradan hareketle, meteorolojik ölçümlerin yapıldığı 14:02 - 15:02 zaman aralığı için bağıl ağırlık katsayısı Tablo 3.2'den

0,90 olarak belirlendi. OCA.23 tarihinde ölçülen meteorolojik veriler %78 bağıl nem, 286 Kelvin sıcaklık ve 6.3 m/s rüzgâr hızı parametreleri kullanılarak tahmin edilen atmosferik türbülans değeri 1 x 10^{-14} $m^{-2/3}$ olarak hesaplandı.

NİS.23 tarihinde ölçülen atmosferik veriler kullanılarak yapılan atmosferik türbülans tahmini için gün doğum saati 06:40 ve gün batım saati 19:31 olarak alındı. Zamanın ağırlık katsayısını bulmak için gerçekleştirilen hesaplama sonucu güneş yaklaşık 13 saat boyunca ölçüm yapılan koordinatları aydınlatmıştır. Model yaklaşımına göre türbülans, gün doğumunun 7. saatinde oluşmaktadır. Bu saat yaklaşık 13:40 civarına denk gelmektedir. Buradan hareketle, meteorolojik ölçümlerin yapıldığı 11:17 – 12:17 zaman aralığı için bağıl ağırlık katsayısı Tablo 3.2'den 0,75 olarak belirlendi. NİS.23 tarihinde ölçülen meteorolojik veriler %87 bağıl nem, 282 Kelvin sıcaklık ve 5.8 m/s rüzgâr hızı parametreleri kullanılarak tahmin edilen atmosferik türbülans değeri 1 x 10^{-14} $m^{-2/3}$ olarak hesaplandı.

TEM.23 tarihinde ölçülen atmosferik veriler kullanılarak yapılan atmosferik türbülans tahmini için gün doğum saati 05:46 ve gün batım saati 20:31 olarak alındı. Zamanın ağırlık katsayısını bulmak için gerçekleştirilen hesaplama sonucu güneş yaklaşık 15 saat boyunca ölçüm yapılan koordinatları aydınlatmıştır. Model yaklaşımına göre türbülans, en yoğun gün doğumunun 8. saatinde oluşmaktadır. Bu saat yaklaşık 13.46 civarına denk gelmektedir. Buradan hareketle, meteorolojik ölçümlerin yapıldığı 13:34 - 14:34 zaman aralığı için bağıl ağırlık katsayısı Tablo 3.2'den 1,00 olarak belirlendi. TEM.23 tarihinde ölçülen meteorolojik veriler %51 bağıl nem, 302 Kelvin sıcaklık ve 9,7 m/s rüzgâr hızı parametreleri kullanılarak tahmin edilen atmosferik türbülans değeri 1 x 10^{-13} $m^{-2/3}$ olarak hesaplandı.

EKİ.23 tarihinde ölçülen atmosferik veriler kullanılarak yapılan atmosferik türbülans tahmini için gün doğum saati 07:08 ve gün batım saati 18:30 olarak alındı. Zamanın ağırlık katsayısını bulmak için gerçekleştirilen hesaplama sonucu güneş yaklaşık 11 saat boyunca ölçüm yapılan koordinatları aydınlatmıştır. Model yaklaşımına göre türbülans, gün doğumunun 6. saatinde oluşmaktadır. Bu saat yaklaşık 13.08 civarına denk gelmektedir. Buradan hareketle, meteorolojik ölçümlerin yapıldığı 14:29 - 15:29 zaman aralığı için bağıl ağırlık katsayısı Tablo 3.2'den 0,80 olarak belirlendi. EKİ.23 tarihinde ölçülen meteorolojik veriler % 65 bağıl nem, 292 Kelvin sıcaklık ve 9.9 m/s rüzgâr hızı

parametreleri kullanılarak tahmin edilen atmosferik türbülans değeri 1 x 10^{-13} $m^{-2/3}$ olarak hesaplandı.

3.4. Ölçülen ve Tahmini Atmosferik Türbülans Değerlerinin Karşılaştırılması

Atmosferik türbülans değerlerinin ölçülen değerleri ve meteorolojik verilerle hesaplanan tahmini değerlerinin karşılaştırması Tablo 3.5'te verilmiş ve grafikleri Şekil 3.10, Şekil 3.11, Şekil 3.12 ve Şekil 3.13'. Tabloda verilen değerler karşılaştırıldığında, meteorolojik ölçüm cihazının hassasiyeti (± 0.2 derece sıcaklık, ±%2 bağıl nem, ±0.3 m/s rüzgar hızı) (Ortana, 2024), atmosferin aeorosol içeriği, türbülans ölçüm cihazının hata payı (Irwin, 2018) ve tahmin modelinin gerçek değerlerle korelasyonu (Sadot ve Kopeika, 1992) göz önüne alındığında ölçülen ve tahmin edilen atmosferik türbülans değerlerinin hata payı dahilinde birbirleri ile uyumlu oldukları değerlendirilebilir. Belirsizlik analizleri hitamında türbülans değerlerinde ihmal edilebilir %10'luk belirsizlik mevcuttur.

Tablo 3.5. Ölçülen ve hesaplanan atmosferik türbülans değerleri.

Tarih	Ölçülen türbülans değerleri	Tahmin edilen türbülans değerleri
OCA.23	1,63E-15±%10	1,00E-14 ±%10
NİS.23	1,25E-14±%10	1,00E-14±%10
TEM.23	1,48E-14±%10	1,00E-13±%10
EKİ.23	1,04E-13±%10	1,00E-13±%10

4. ATMOSFERİK TÜRBÜLANSIN ELEKTRO-OPTİK GÖRÜNTÜLEME SİSTEMİNİN PERFORMANSINA ETKİ ANALİZİ

Tez çalışmasının bu bölümünde havanın kırıcılık indisinin değişimine yol açan atmosferik türbülansın keşif gözetleme sistemleri üzerindeki etkisi incelendi. Bu amaçla bir elektro-optik keşif görüntüleme sistemi olan ve bu çalışmada kullanılan kısa dalga boyu kızılötesi SWIR kameranın tespit, tanıma ve kimliklendirme analizleri yapıldı. Hem ölçülen hem de tahmin edilen atmosferik türbülans değerleri kullanılarak gerçekleştirilen analizlerin sonuçları karşılaştırmalı olarak irdelendi.

4.1. DRI Analizleri

DRI analizi Detection-Recognation-Identification ile verilen ifadenin baş harfleri ile isimlendirilen bir Tespit-Tanıma-Kimliklendirme analizidir. Bu analiz bir yazılım ile gerçekleştirilir. Night Vision Integreted Performance Model (NVIPM) yazılımı, ABD ordusu tarafından geliştirilen elektro-optik sensörü, atmosferi, gözlemciyi, hedefi detaylıca tanımlayarak sensör performansını karakterize etmek için kullanılan bir yazılımdır (Ross ve diğ., 2012). Bir elektro-optik sistemin performansını değerlendirmek için kullanılan bu DRI analiz yazılımda, atmosferi modelleyerek atmosferik geçirgenliğini hesaplayabilen MODerate resolution atmospheric TRANsmission (MODTRAN) algoritması mevcuttur. Amerika Birleşik Devletleri tarafından 1987 yılında geliştirilen ve 2008 yılında ABD Hava Kuvvetleri'ne patentlenen bu algoritma, morötesinden uzak kızılötesine kadar olan optik tayfta atmosferik geçirgenliği hesaplayabilmektedir.

Bu çalışmada atmosferi modellemek için; ölçüm yapılan günlere ait atmosferik verilerle birlikte aerosol modellemeleri için MODTRAN algoritmasında yer alan Navy Maritime aerosol modeli kullanıldı.

Atmosfer modelleri içinden soğuk günler için Mid-Latitude Winter ve sıcak günler için Mid-Latitude Summer modelleri seçildi. NİS.23 tarihinde atmosferik görüş 10 km altına düştüğü için SWIR kamera görüntüleri mevcut değildir ancak analizlerin eşit şartlarda yapılıp karşılaştırılabilmesi amacıyla modellemede atmosferik görüş parametresi >30 km kabul edildi. Yazılımda kullanılan sensör, hedef ve gözlemci parametreleri gerçekleştirilen deneysel çalışmalar ile örtüşecek şekilde seçildi.

DRI analizleri için hem görünür hem de termal bandı kapsayan 0,3 -13 mikrometre dalga boyu aralığında algılama yapabilen 640x512 piksel çözünürlüğünde soğutmalı ideal bir sensör tanımlandı. Sensör piksel aralıkları hem yatayda hem dikeyde 15 mikrometre olarak tanımlandı. Algılama yapılan kamera parametreleri için 100 mm optik açıklık, 300 mm odak uzunluğu tanımlandı. Ayrıca yine sistemin performansına etki edebilecek olması nedeniyle optiklerin sıcaklıkları o günkü ortam sıcaklığı baz alınarak ortam sıcaklığına eşit olarak seçildi.

Elektro-optik sistemlerin performansına etki eden en önemli parametrelerden biri hedef sıcaklığıdır. Hedefin arka plandan ayırt edilebilmesi hedef ile arka plan arasında kontrast miktarına bağlıdır. Kontrast miktarı arttıkça sistemin hedefi arka plandan ayırt etmesi kolaylaşır ve menzilleri yükselir.

Bu çalışmada hedef sıcaklığı, atmosfer sıcaklığından her gün için 3 °C kontrast sıcaklık verecek şekilde seçildi ve hedef boyutu 3x3 metre olarak tanıtıldı.

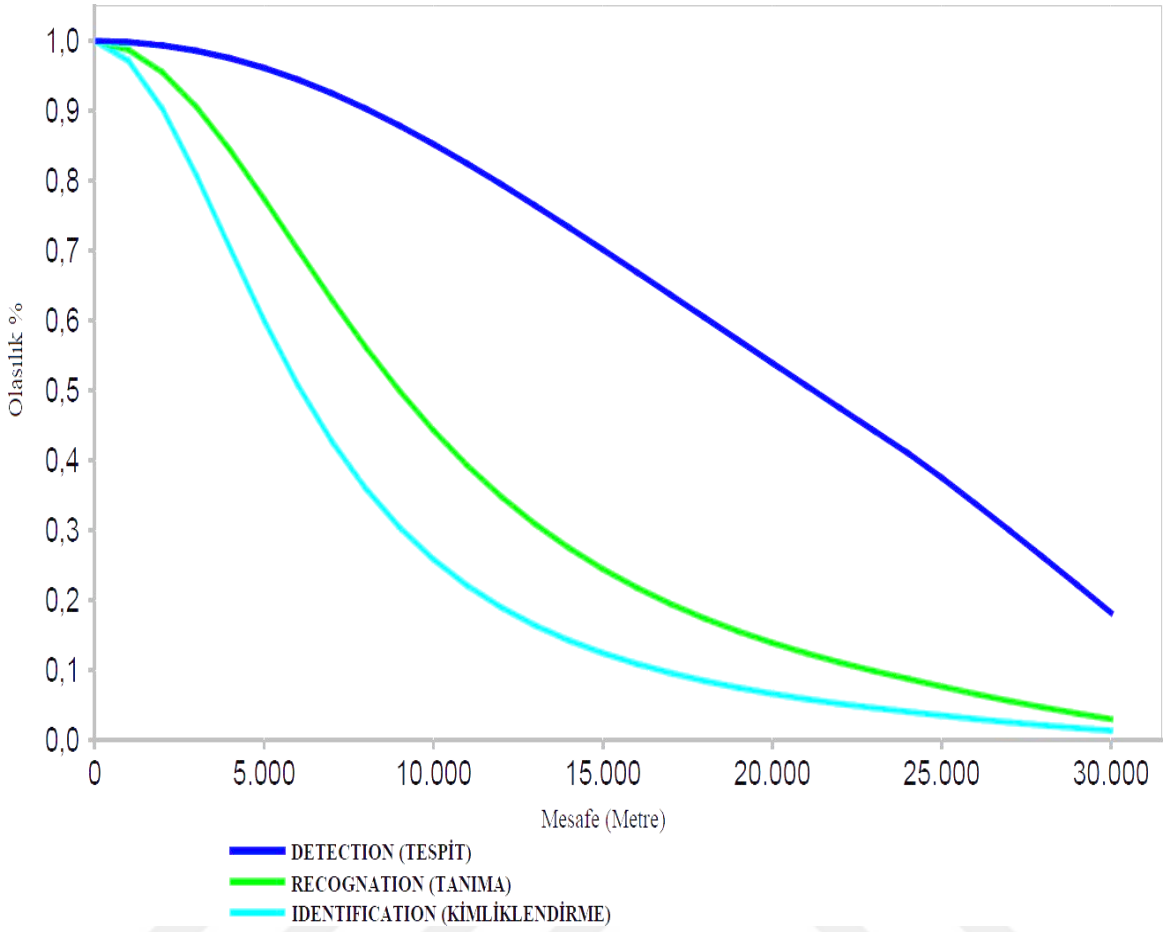
Gözlemci parametreleri 10 metre deniz üstü irtifa ve 30 km menzil olarak seçildi. DRI analizleri sırasında elektro-optik detektörünü tanımlayan parametreler sabit tutulmuş atmosferik türbülans verileri ve meteorolojik parametreler değişken olarak kullanılmıştır.

4.1.1. Ölçülen Atmosferik Türbülans Parametresi Kullanılan DRI Analizleri

Atmosferik türbülansın, elektro-optik keşif gözetleme sistemi olan SWIR kamera üzerine etkisini incelemek amacıyla, tezin üçüncü bölümünde değerleri verilen ölçülen C_n^2 atmosferik türbülans parametreleri kullanılarak DRI analizleri yapıldı.

Elde edilen analiz sonuçları, SWIR kameranın tespit, tanıma ve kimliklendirme performanslarının mesafeye bağlı olarak değişim grafikleri şeklinde verildi ve grafikler yorumlanarak menzil-performans tabloları oluşturuldu.

OCA.23 tarihinde ölçülen C_n^2 atmosferik türbülans parametresi 1,63 x 10^{-15} $m^{-2/3}$ kullanılarak yapılan DRI performans analizi grafiği Şekil 4.1'de gösterilmiştir. Bu DRI analizinden elde edilen menzil-performans değerleri Tablo 4.1'de verilmiştir.

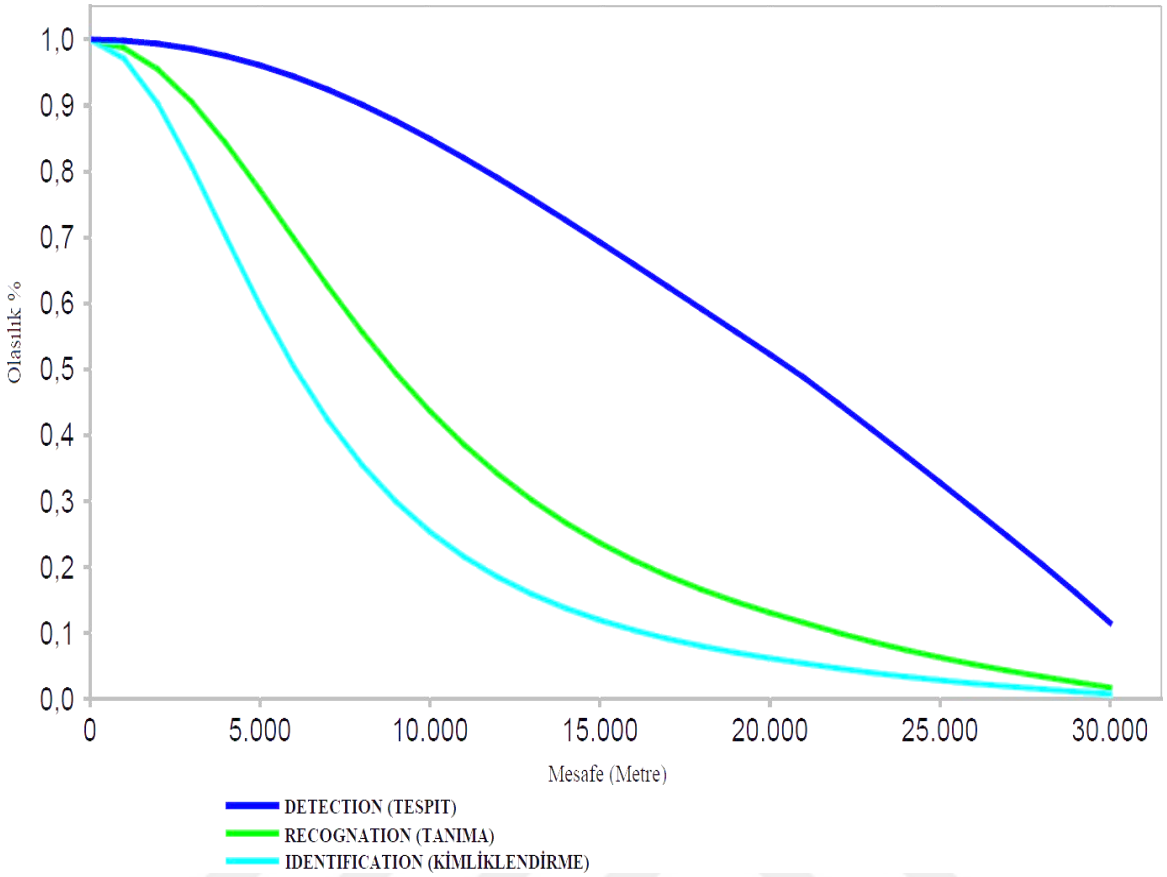


Şekil 4.1. OCA.23 tarihinde ölçülen C_n^2 atmosferik türbülans parametresi 1,63 x 10^{-15} $m^{-2/3}$ kullanılarak yapılan DRI performans analizi.

Tablo 4.1. OCA.23 tarihinde ölçülen C^2 parametresini içeren DRI analizinden elde edilen menzil-performans değerleri.

	Tespit	Tanıma	Kimliklendirme
0 km	100%	100%	100%
5 km	97%	78%	60%
10 km	85%	45%	26%
15 km	70%	25%	12%
20 km	54%	14%	8%
25 km	38%	9%	4%
30 km	19%	3%	1%

NİS.23 tarihinde ölçülen C_n^2 atmosferik türbülans parametresi 1,25 x 10^{-14} $m^{-2/3}$ kullanılarak yapılan DRI performans analizi grafiği Şekil 4.2'de gösterilmiştir. Bu DRI analizinden elde edilen menzil-performans değerleri Tablo 4.2'de verilmiştir.

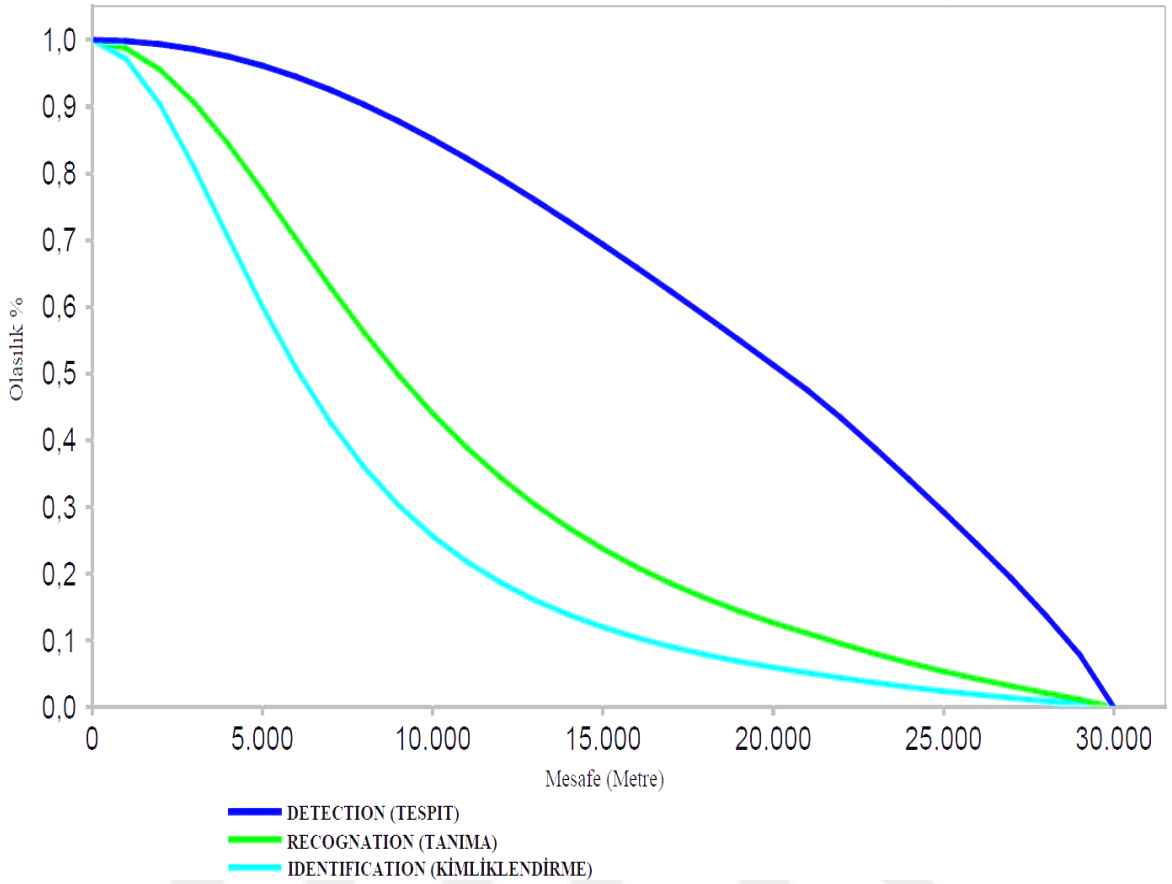


Şekil 4.2. NİS.23 tarihinde ölçülen C_n^2 atmosferik türbülans parametresi 1,25 x 10-14 m-2/3 kullanılarak yapılan DRI performans analizi.

Tablo 4.2. NİS.23 tarihinde ölçülen C_n^2 parametresini içeren DRI analizinden elde edilen menzil-performans değerleri.

	Tespit	Tanıma	Kimliklendirme
0 km	100%	100%	100%
5 km	96%	78%	60%
10 km	85%	44%	26%
15 km	70%	23%	12%
20 km	52%	12%	7%
25 km	32%	6%	3%
30 km	12%	2%	1%

TEM.23 tarihinde ölçülen C_n^2 atmosferik türbülans parametresi 1,48 x 10^{-14} $m^{-2/3}$ kullanılarak yapılan DRI performans analizi grafiği Şekil 4.3'te gösterilmiştir. Bu DRI analizinden elde edilen menzil-performans değerleri Tablo 4.3'te verilmiştir.

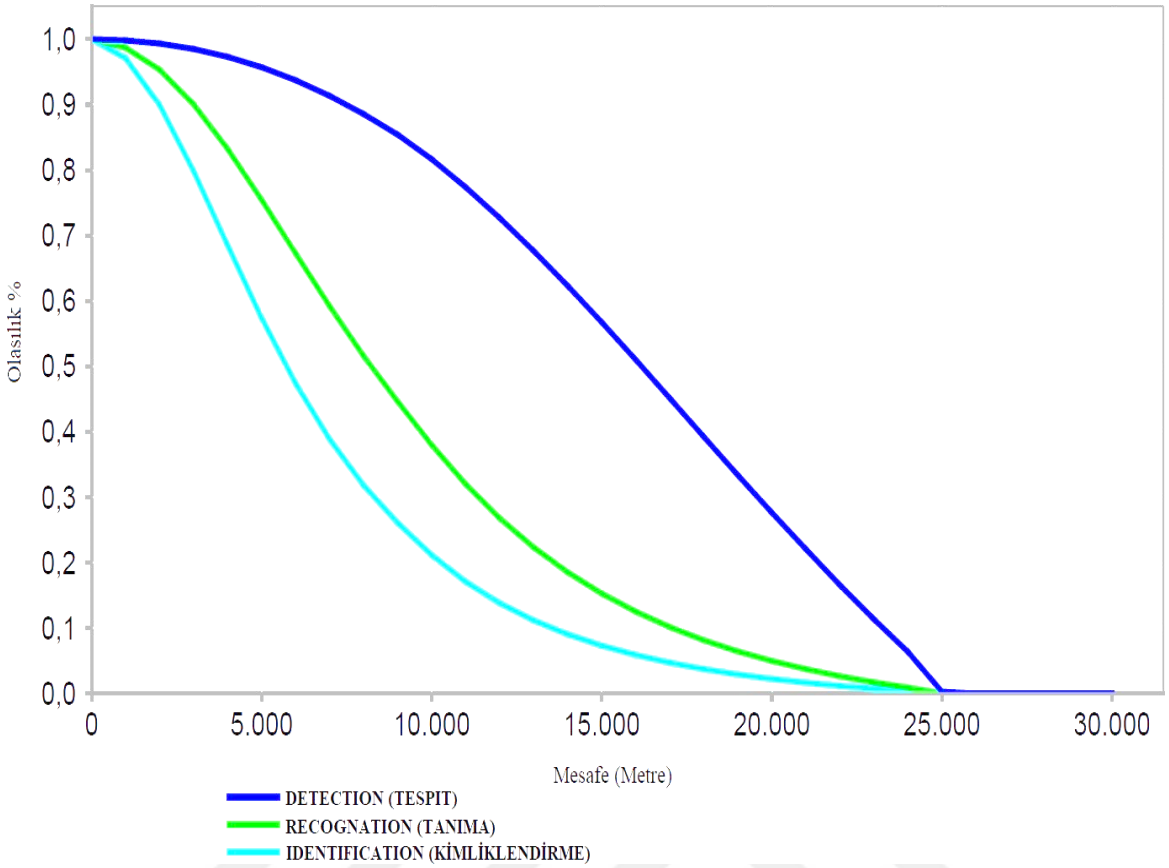


Şekil 4.3. TEM.23 tarihinde ölçülen C^2 atmosferik türbülans parametresi 1,48 x 10^{-14} $m^{-2/3}$ kullanılarak yapılan DRI performans analizi.

Tablo 4.3. TEM.23 tarihinde ölçülen C^2 parametresini içeren DRI analizinden elde edilen menzil-performans değerleri.

	Tespit	Tanıma	Kimliklendirme
0 km	100%	100%	100%
5 km	96%	78%	60%
10 km	85%	43%	25%
15 km	70%	23%	11%
20 km	51%	12%	7%
25 km	29%	5%	2%
30 km	0%	0%	0%

EKİ.23 tarihinde ölçülen C_n^2 atmosferik türbülans parametresi 1,04 x 10^{-13} $m^{-2/3}$ kullanılarak yapılan DRI performans analizi grafiği Şekil 4.4'de gösterilmiştir. Bu DRI analizinden elde edilen menzil-performans değerleri Tablo 4.4'de verilmiştir.



Şekil 4.4. EKİ.23 tarihinde ölçülen C_n^2 atmosferik türbülans parametresi 1,04 x 10^{-13} $m^{-2/3}$ kullanılarak yapılan DRI performans analizi.

Tablo 4.4 EKİ.23 tarihinde ölçülen C_n^2 parametresini içeren DRI analizinden elde edilen menzil-performans değerleri.

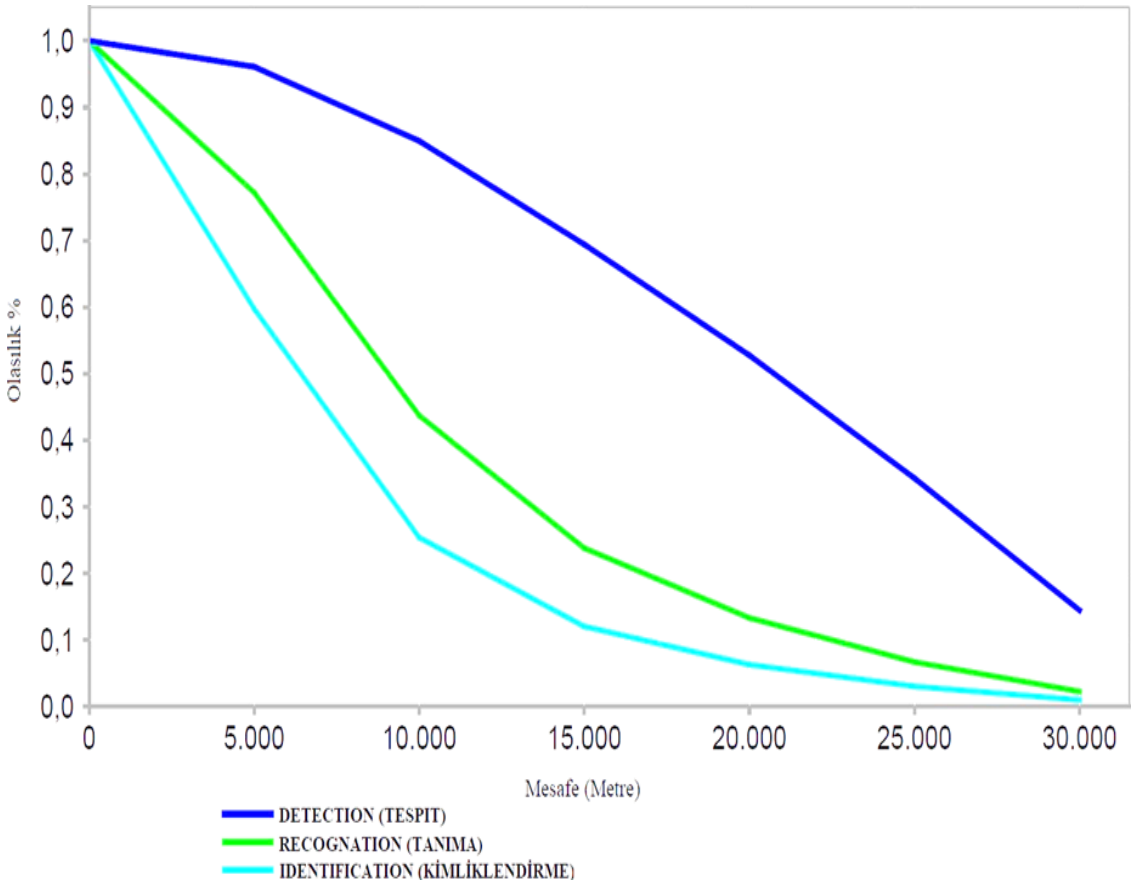
	Tespit	Tanıma	Kimliklendirme
0 km	100%	100%	100%
5 km	95%	75%	58%
10 km	81%	38%	21%
15 km	56%	15%	7%
20 km	28%	5%	2%
25 km	0%	0%	0%
30 km	0%	0%	0%

4.1.2. Tahmini atmosferik türbülans parametresi kullanılan DRI analizleri

Sadot-Kopeik ampirik model kullanılarak hesaplanan C_n^2 atmosferik türbülans parametreleri kullanılarak DRI analizleri yapıldı. Elde edilen analiz sonuçları, SWIR kameranın tespit, tanıma ve kimliklendirme performanslarının mesafeye bağlı olarak değişim grafikleri şeklinde verildi ve grafikler yorumlanarak menzil-performans tabloları

oluşturuldu.

OCA.23 tarihli meteorolojik verilerle hesaplanan C_n^2 atmosferik türbülans parametresi 1 x 10^{-14} $m^{-2/3}$ kullanılarak yapılan DRI performans analizi grafiği Şekil 4.5'te gösterilmiştir. Bu DRI analizinden elde edilen menzil-performans değerleri Tablo 4.5'te verilmiştir.

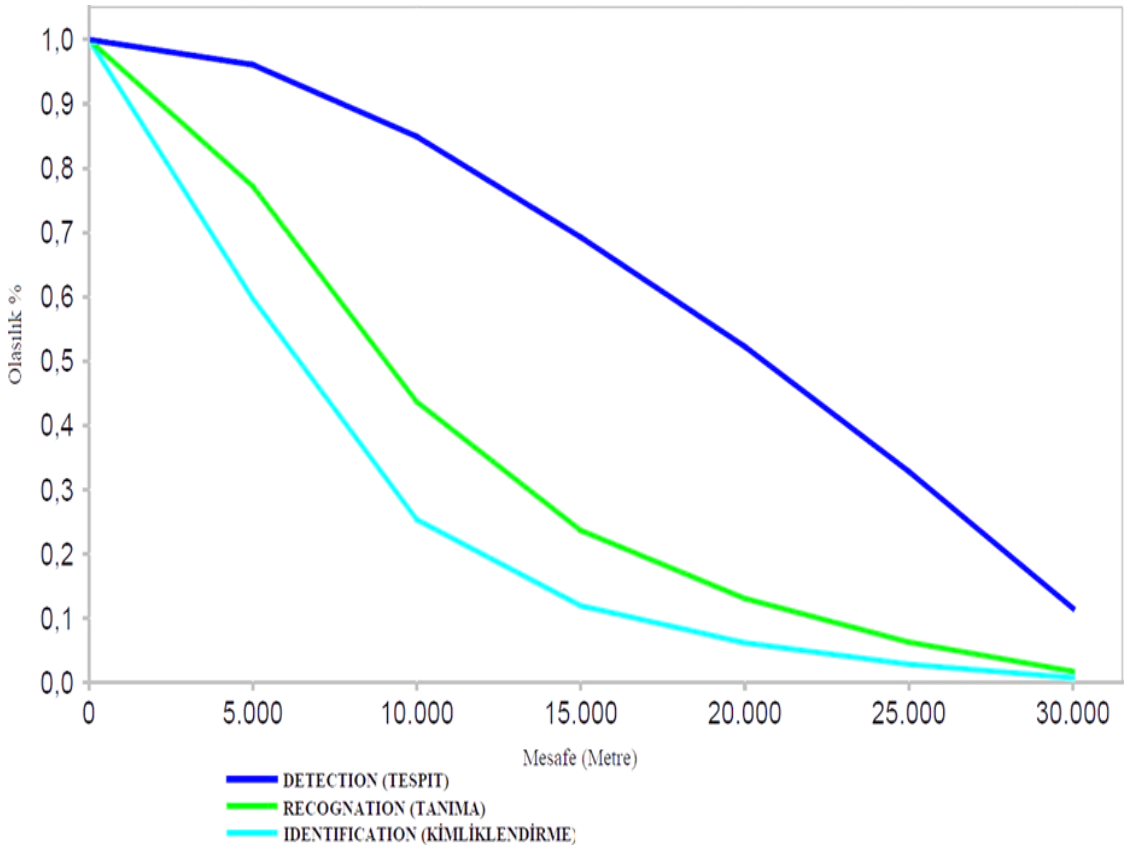


Şekil 4.5. OCA.23 tarihli verilerle tahmin edilen C_n^2 atmosferik türbülans parametresi 1 x 10-14 m-2/3 kullanılarak yapılan DRI performans analizi.

Tablo 4.5. OCA.23 tarihli verilerle tahmin edilen C_n^2 parametresini içeren DRI analizinden elde edilen menzil-performans değerleri.

	Tespit	Tanıma	Kimliklendirme
0 km	100%	100%	100%
5 km	96%	78%	60%
10 km	82%	42%	25%
15 km	70%	24%	12%
20 km	52%	13%	7%
25 km	34%	8%	2%
30 km	15%	2%	1%

NİS.23 tarihinde ölçülen meteorolojik verilerle hesaplanan C_n^2 atmosferik türbülans parametresi 1 x 10^{-14} $m^{-2/3}$ kullanılarak yapılan DRI performans analizi grafiği Şekil 4.6'da gösterilmiştir. Bu DRI analizinden elde edilen menzil-performans değerleri Tablo 4.6'da verilmiştir.



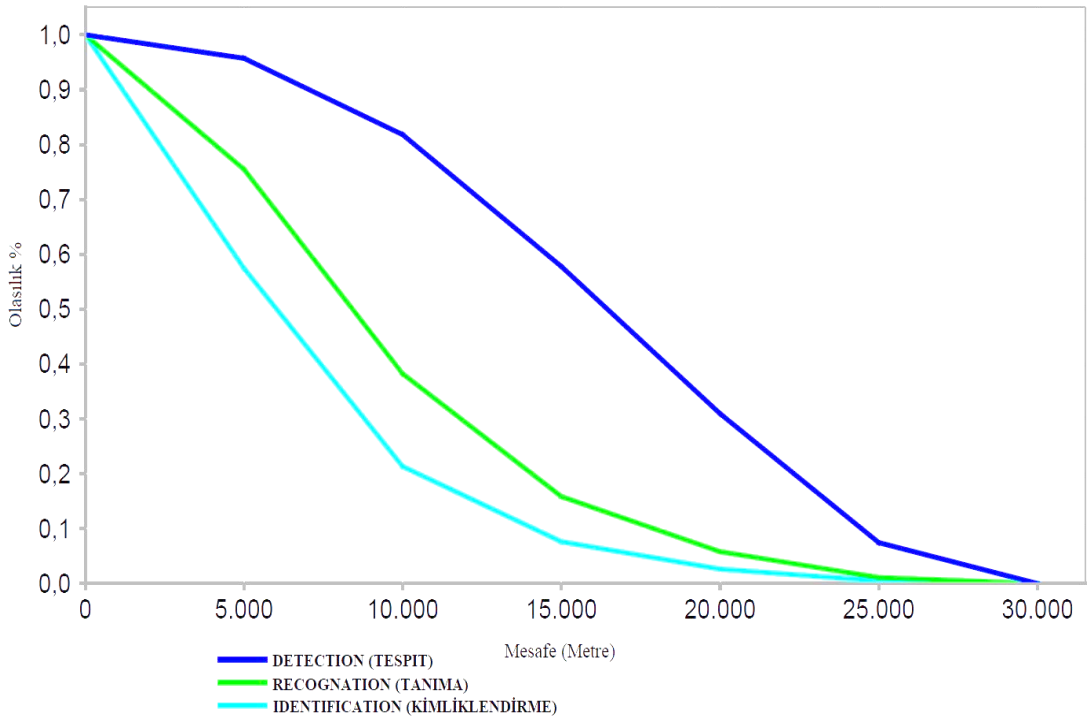
Şekil 4.6. NİS.23 tarihli verilerle tahmin edilen C_n^2 atmosferik türbülans parametresi 1 x 10^{-14} $m^{-2/3}$ kullanılarak yapılan DRI performans analizi.

Tablo 4. 6. NİS.23 tarihli verilerle tahmin edilen C_n^2 parametresini içeren DRI analizinden elde edilen menzil-performans değerleri.

	Tespit	Tanıma	Kimliklendirme
0 km	100%	100%	100%
5 km	97%	78%	60%
10 km	85%	43%	25%
15 km	69%	23%	11%
20 km	52%	14%	6%
25 km	32%	8%	2%
30 km	11%	2%	1%

TEM.23 tarihinde ölçülen meteorolojik verilerle hesaplanan C_n^2 atmosferik türbülans parametresi 1 x 10^{-13} $m^{-2/3}$ kullanılarak yapılan DRI performans analizi grafiği Şekil

4.7'de gösterilmiştir. Bu DRI analizinden elde edilen menzil-performans değerleri Tablo 4.7'de verilmiştir.

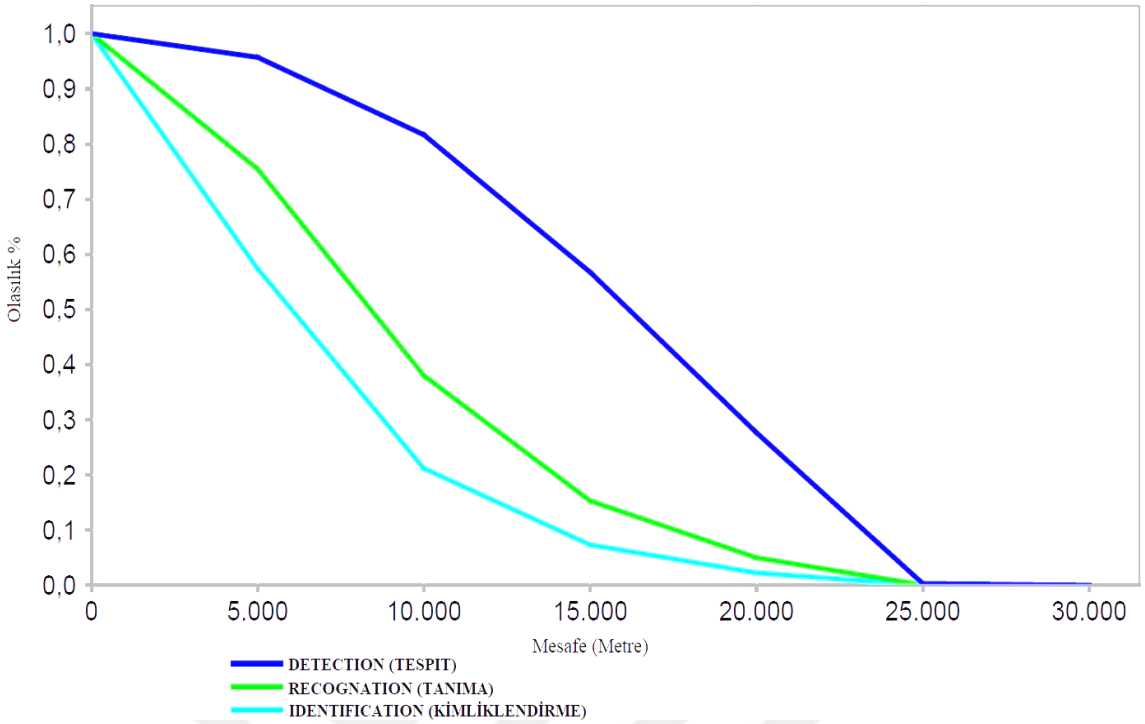


Şekil 4.7. TEM.23 tarihli verilerle tahmin edilen C_n^2 atmosferik türbülans parametresi 1 x 10^{-13} $m^{-2/3}$ kullanılarak yapılan DRI performans analizi.

Tablo 4.7. TEM.23 tarihli verilerle tahmin edilen C_n^2 parametresini içeren DRI analizinden elde edilen menzil-performans değerleri.

	Tespit	Tanıma	Kimliklendirme
0 km	100%	100%	100%
5 km	96%	75%	58%
10 km	82%	39%	21%
15 km	59%	16%	8%
20 km	30%	6%	2%
25 km	8%	1%	0%
30 km	0%	0%	0%

EKİ.23 tarihinde ölçülen meteorolojik verilerle hesaplanan C_n^2 atmosferik türbülans parametresi 1 x 10^{-13} $m^{-2/3}$ kullanılarak yapılan DRI performans analiz grafiği Şekil 4.8'de gösterilmiştir. Bu DRI analizinden elde edilen menzil-performans değerleri Tablo 4.8'de verilmiştir.



Şekil 4.8. EKİ.23 tarihli verilerle tahmin edilen C_n^2 atmosferik türbülans parametresi 1 x 10^{-13} $m^{-2/3}$ kullanılarak yapılan DRI performans analizi.

Tablo 4.8. EKİ.23 tarihli verilerle tahmin edilen C_n^2 parametresini içeren DRI analizinden elde edilen menzil-performans değerleri.

	Tespit	Tanıma	Kimliklendirme
0 km	100%	100%	100%
5 km	95%	75%	58%
10 km	81%	39%	21%
15 km	56%	15%	8%
20 km	28%	5%	1%
25 km	0%	0%	0%
30 km	0%	0%	0%

4.2. Karşılaştırmalı DRI Analizleriyle Elektro-Optik Detektörün Performans Değerlendirmesi

Tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen çalışmaları kısaca özetlersek, atmosferik türbülansın elektro-optik keşif gözetleme sistemleri üzerine etkilerini incelemek amacıyla bir yıllık veri toplama sürecinde farklı mevsimlere ait günlerde, günün aynı saat periyodu kullanılarak hem atmosferik türbülans ölçümleri yapıldı hem de atmosferin meteorolojik verileri kaydedildi. Toplanan bu meteorolojik veriler kullanılarak atmosferik türbülans

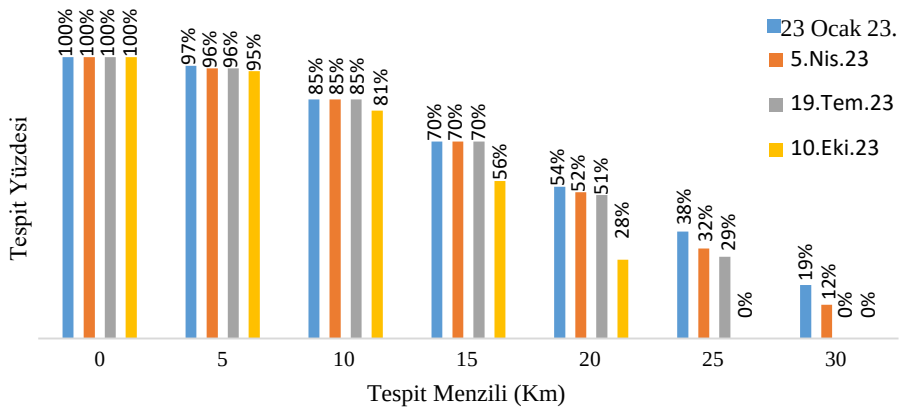
tahmini yapıldı, kullanılan model ile anlık ölçülen türbülans değerleri karşılaştırıldı ve elde edilen sonuçların hata payı içerisinde birbirleriyle uyumlu olduğu değerlendirildi.

Deneysel verilerin toplandığı zaman dilimlerinde, elektro-optik sensörlerin bu farklı atmosferik türbülans koşullarında menzil performansının değerlendirmesi için NV-IPM yazılımı kullanılarak DRI analizleri yapıldı. Analizler esnasında elektro-optik detektörünü tanımlayan parametreler sabit tutularak atmosferik türbülans verileri ve meteorolojik parametreler değişken olarak kullanıldı.

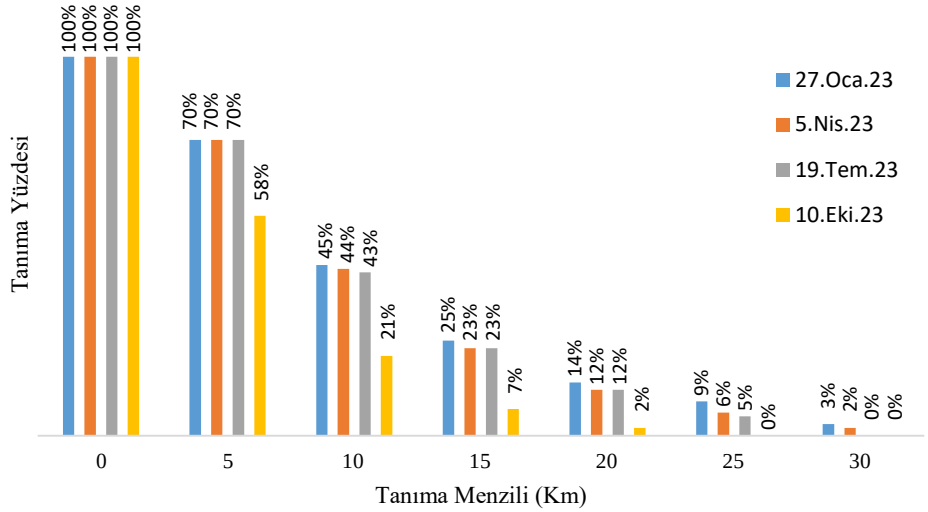
Bu bölümde hem ölçülen hem de tahmin edilen atmosferik türbülans parametreleri kullanılarak yapılan DRI analiz sonuçları karşılaştırmalı olarak verilerek elektro-optik detektörün performansı değerlendirildi.

Ölçülen atmosferik türbülans parametrelerine yönelik gerçekleştirilen DRI analizleri Şekil 4.9 Şekil 4.10 ve Şekil 4.11'de sırasıyla tespit, tanıma ve kimliklendirme menzillerine göre karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Şekillerde verilen karşılaştırmalara göre atmosferik türbülans şiddetinin artışı ile elektro-optik dedektörün DRI performansı arasında ters bir korelasyon olduğu görülmektedir.

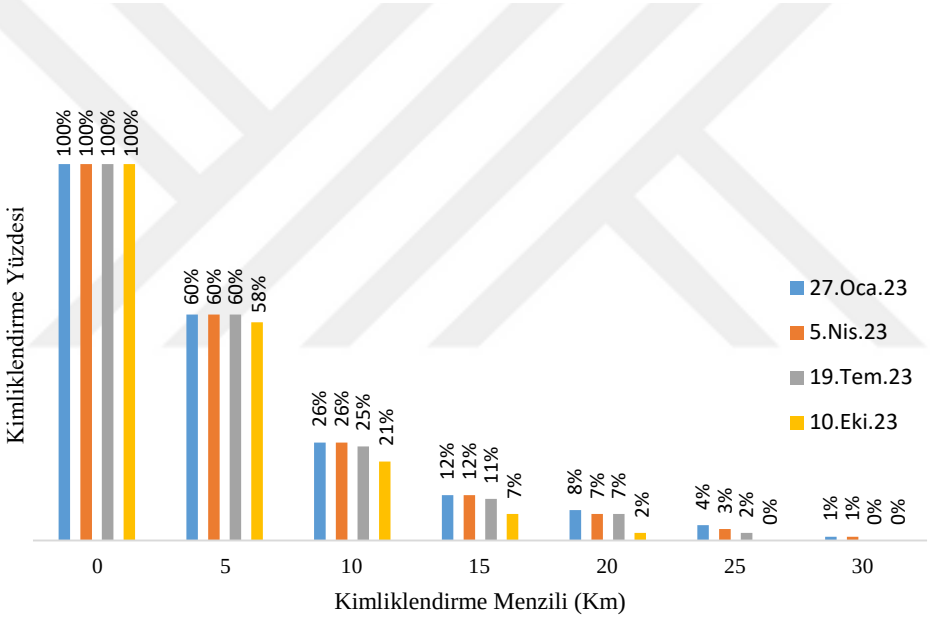
Türbülans artışının kümülatif etkisi, artan menzillerle birlikte artan türbülans etkisi, düşük DRI performansına yol açmaktadır. Yapılan analizlerde 10 km ve ötesi menzillerde dramatik performans kayıpları görülmüştür.



Şekil 4.9. Ölçülen C_n^2 için karşılaştırmalı tespit menzilleri.



Şekil 4.10. Ölçülen C_n^2 için karşılaştırmalı tanıma menzilleri.

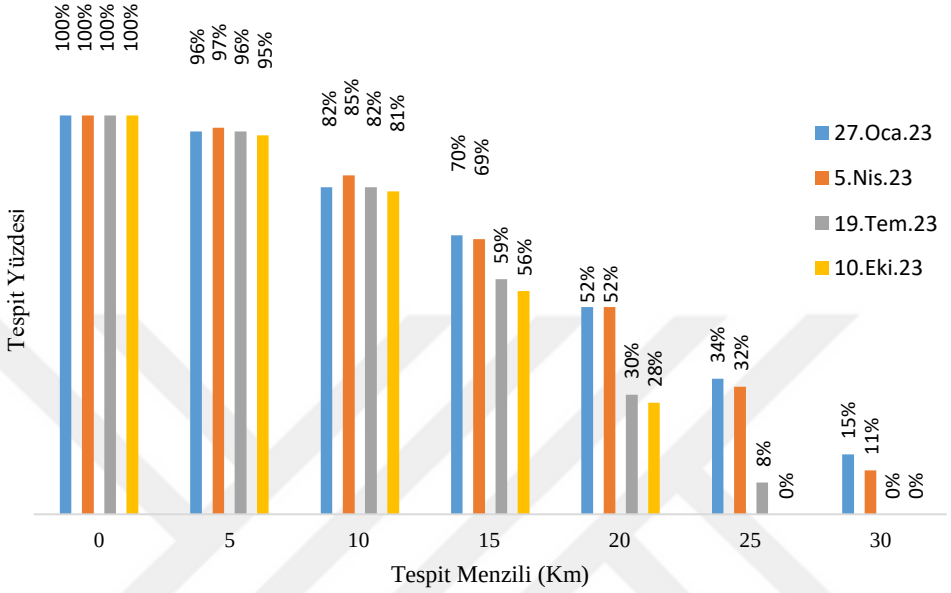


Şekil 4.11. Ölçülen C_n^2 için karşılaştırmalı kimliklendirme menzilleri.

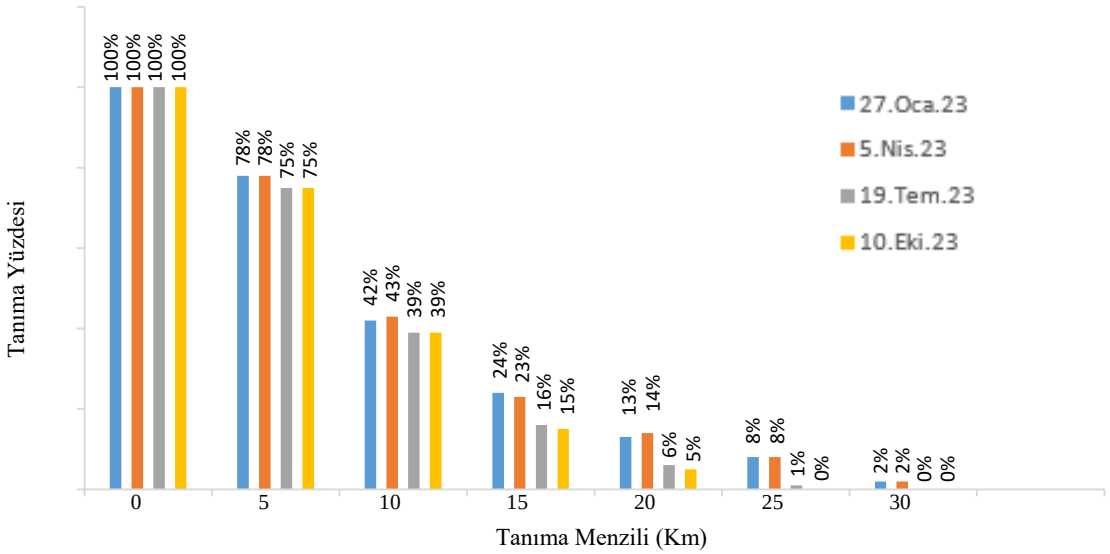
Tahmin edilen atmosferik türbülansa göre yapılmış DRI analizleri karşılaştırmalı olarak Şekil 4.12, Şekil 4.13 ve Şekil 4.14'de verilmiştir.

Ölçülen atmosferik türbülans ve tahmin edilen atmosferik türbülans değerleri ufuk ötesi menzile kadar (Gözlemcinin deniz seviyesine göre 25 metre yükseklikte olduğu varsayıldığında ufuk çizgisi yaklaşık 20 km'dir.) birbirleriyle meteorolojik ölçüm cihazının hassasiyeti (± 0.2 derece sıcaklık, ±%2 bağıl nem, ±0.3 m/s rüzgar hızı) (Ortana, 2024), atmosferin aeorosol içeriği, türbülans ölçüm cihazının hata payı (Irwin, 2018), ve DRI analizi yaparken atmosferik geçirgenlik algoritması MODTRAN

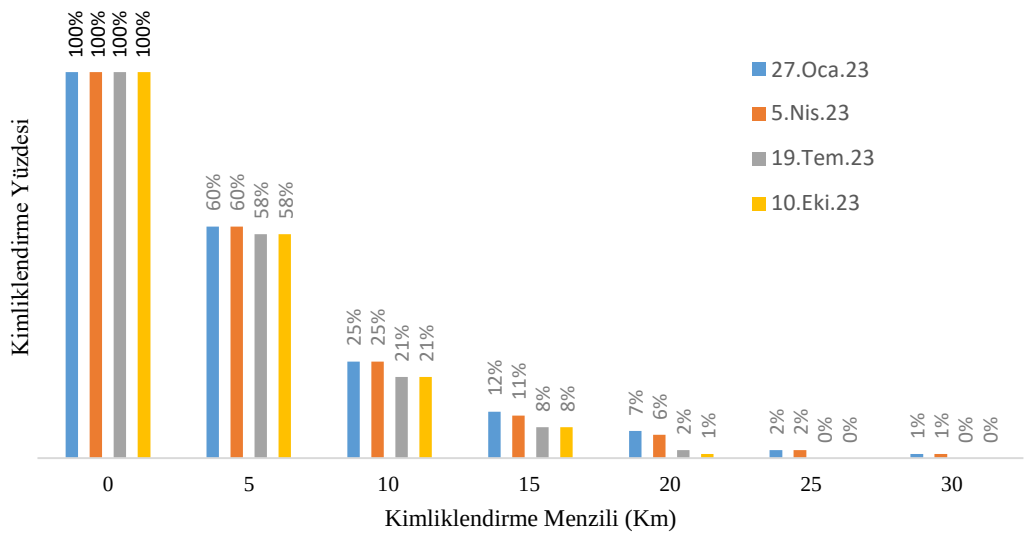
kaynaklı belirsizlikler (Gao ve diğ., 2023) çerçevesinde örtüştüğü değerlendirilebilir. Bu değerlendirmeler göz önüne alındığında söz konusu belirsizliklere rağmen ölçülen atmosferik türbülans değerleri ile tahmin edilen atmosferik türbülans değerlerinin birbirleri ile örtüşmesi, türbülans tahmininin, türbülans ölçümü gerektiren koşullarda kullanılabileceğini göstermiştir.



Şekil 4.12. Tahmin Edilen C_n^2 için karşılaştırmalı tespit menzilleri.



Şekil 4.13. Tahmin Edilen C_n^2 için karşılaştırmalı tanıma menzilleri.



Şekil 4.14. Tahmin Edilen C_n^2 için karşılaştırmalı kimliklendirme menzilleri.

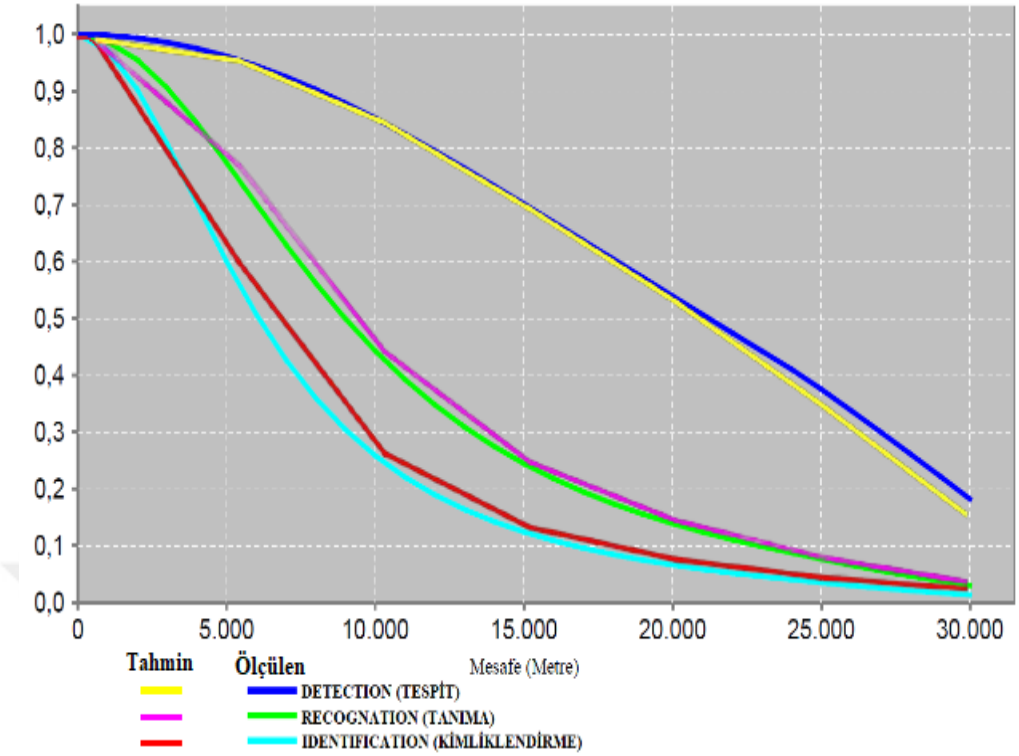
Ölçülen ve tahmin edilen atmosferik türbülansa göre DRI analizlerinde ufuk ötesi menzilde tespit menzilleri için yaklaşık %4'ten daha az miktarda fark bulunmaktadır, tanıma ve kimliklendirme menzilleri belirsizlikler ve hatalar çerçevesinde olduğu değerlendirilmektedir.

Genel analizlere ilave olarak, Temmuz ayına ait DRI analizlerinde ufuk menzilinde tespit menzilleri için yaklaşık %20'den daha az miktarda fark bulunmaktadır

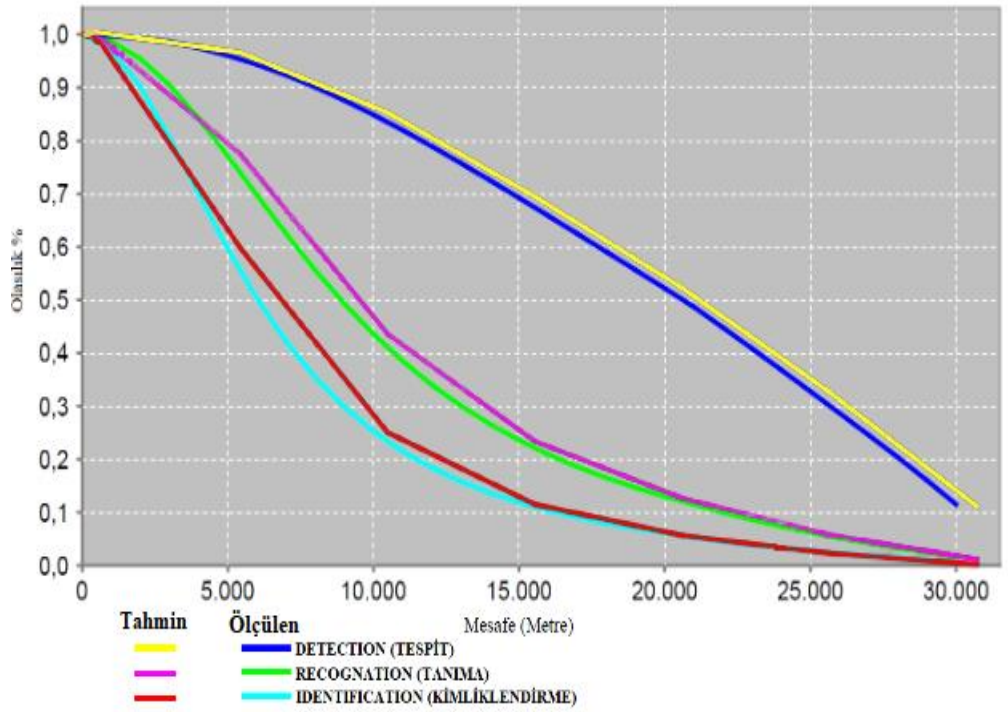
Tespit menzilleri, hedefin ilk kez minimum piksel sayısını doldurarak görüntüde bir cisim olduğunun anlaşıldığı ve kullanıcı ya da tespit algoritmasının "burada hedef var" kararını verebilmesi için gereken hedef-sensör arasındaki maksimum mesafedir. Bu nedenle genellikle menziller hava şartlarına bağlı değişmekle birlikte teşhis ve kimliklendirme menzillerine göre yüksektir. Ancak tespit mesafelerindeki bu yükseklik aynı zamanda atmosferik türbülansın kümülatif etkisinin daha net gözlemlendiği ve farkların oluştuğu durumlara yol açmaktadır.

Hali hazırda teşhis ve kimliklendirme menzilleri nispeten tespit menzillerine göre daha düşük menziller olduğu için göreceli olarak tespit menzillerine oranla daha az etkilenmişlerdir.

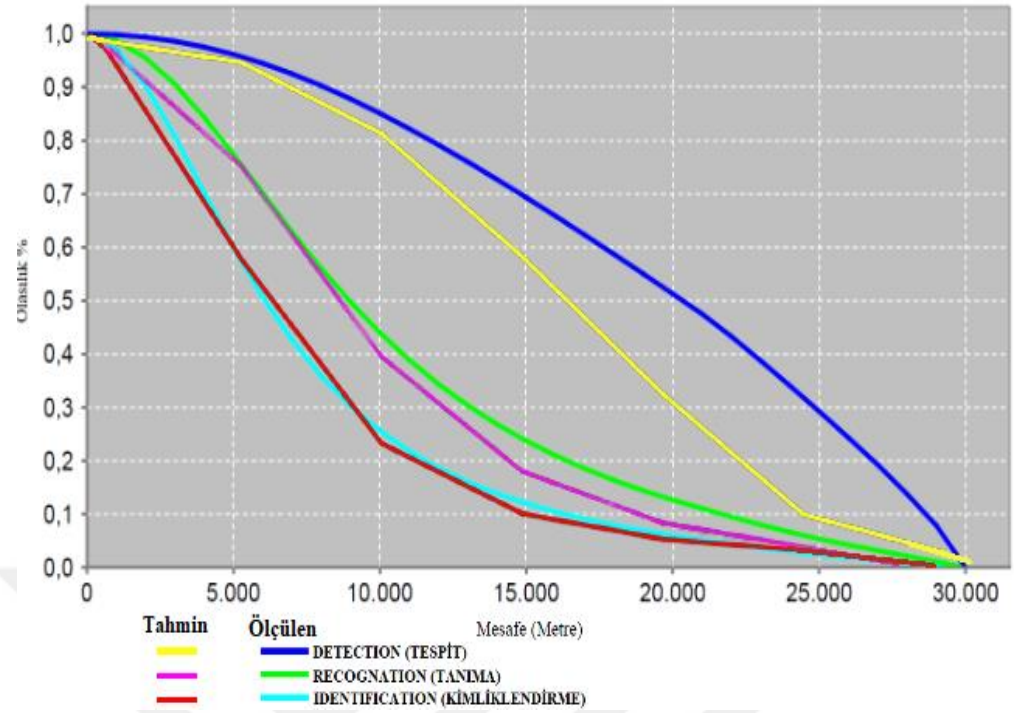
Şekil 4.15, Şekil 4.16 ve Şekil 4.17 ile DRI analizlerine yönelik tahmin edilen ve ölçülen değerlerin karşılaştırmalı grafikleri verilmiştir.



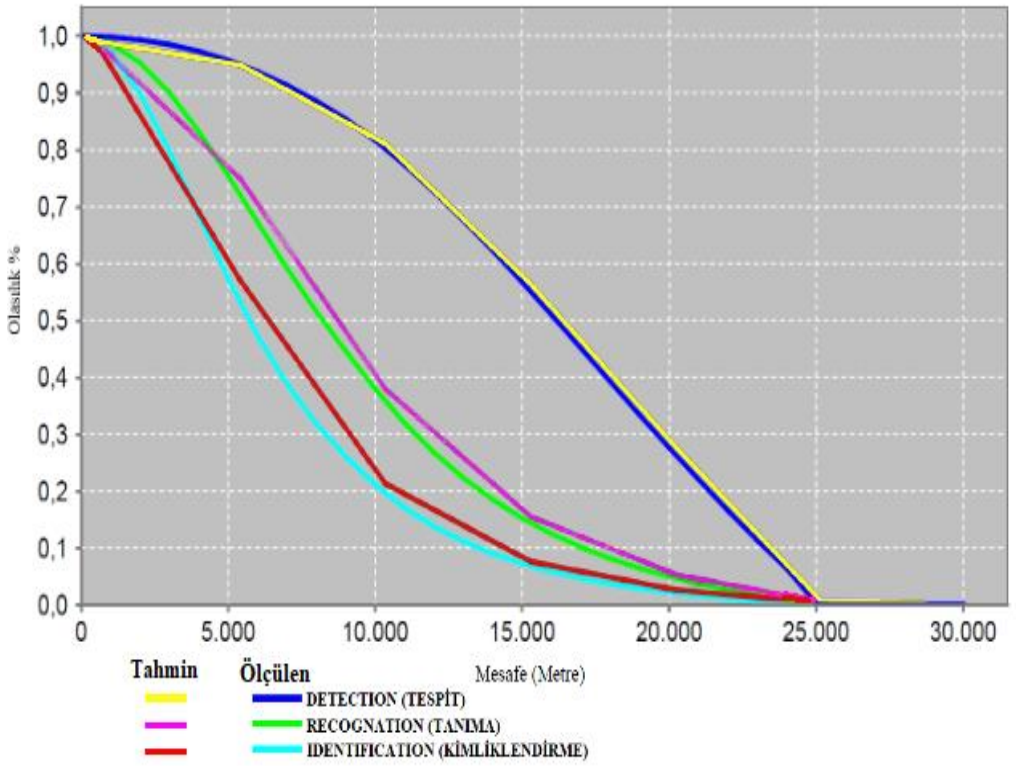
Şekil 4.15. Ocak ayına ait tahmin edilen ve ölçülen C_n^2 için DRI performansı karşılaştırma grafiği.



Şekil 4.16. Nisan ayına ait tahmin edilen ve ölçülen C_n^2 için DRI performansı karşılaştırma grafiği.



Şekil 4.17. Temmuz ayına ait tahmin edilen ve ölçülen C_n^2 için DRI performansı karşılaştırma grafiği.



Şekil 4.18. Ekim ayına ait tahmin edilen ve ölçülen C_n^2 için DRI performansı karşılaştırma grafiği.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada elektro-optik keşif gözetleme sistemlerine yönelik performansı etkileyen ve kestirimi zor olan atmosferik türbülans etkileri ve tahmini üzerine çalışmalar gerçekleştirilmiştir.

Deniz üzerinde oluşan atmosferik türbülans etkisinin elektro-optik sensörler üzerinde oluşturduğu etkiyi modelleyebilmek amacıyla öncelikle farklı mevsim ve günlerde deniz üzerinde atmosferik türbülans ölçümleri yapılarak o günlere ait meteorolojik veriler toplanmıştır. Ardından Sadot-Kopeika ampirik (deneysel) modeli kullanılarak toplanan meteorolojik veriler yerleştirilmiş ve atmosferik türbülans tahmini yapılmıştır. Ölçülen ve tahmin edilen değerler, ölçüm belirsizlikleri ve hata payları göz önünde bulundurularak incelendiğinde birbirleriyle örtüşmektedir.

Elektro-optik keşif gözetleme sistemlerine yönelik performans (DRI) analizleri, ölçülen ve tahmin edilen atmosferik türbülans parametreleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Analizler ışığında, tahmin edilen atmosferik türbülans verisi için yapılan tespit menzilleri ile ölçülen atmosferik türbülans verisi için yapılan tespit menzilleri arasında ufuk menzilinde yaklaşık %15-20 oranında fark olduğu gözlemlenmiştir. Bu fark menzil azaldıkça menzile bağlı azalma eğilimi göstermektedir, belirtilen fark dışında ölçülen ve tahmin edilen atmosferik türbülans değerleri için yapılan DRI analizi sonuçları ölçüm belirsizlikleri ve hata payları çerçevesinde kalacak şekilde birbirleri ile örtüşmektedir. Orta-yüksek türbülans koşullarında atmosferik türbülansın ilk tespit menzilleri üzerindeki etkisi bu şekilde analiz edilmiştir.

Bu çalışmada Sadot-Kopeika ampirik modeli kullanılarak yapılan atmosferik türbülans tahmininin ölçülen değerle paralel seyrettiği gözlenmiştir. Atmosferik türbülans ölçüm faaliyeti altyapı gerektiren kontrollü olması zor bir faaliyettir. Bu nedenle uzun atmosferik yolların atmosferik türbülansları ölçülmek istendiğinde kara ve deniz uygulamaları için dünyanın şekli dahil olmak üzere, kurulum yapmak istenen yerlere istasyonların yerleştirilmesi, atmosferik görüş mesafesinin ölçüm yapmak istenen mesafenin üzerinde olmak zorunda olması, alıcı ve vericiler arasında hizalama hassasiyeti ve kontrolü vb. gibi bir çok problem bulunmaktadır. Bu nedenlerden dolayı atmosferik türbülans değerlerinin tahmini için yeni yöntemler geliştirilmesi gerektiği

değerlendirilmektedir.

Elektro-optik sensörlerin piksellerinde atmosferik türbülans etkisi fiziksel olarak gözle gözlemlenebileceği gibi piksellerdeki doluluk oranını sürekli oynatarak görüntü bozulmalarına y ol açmaktadır. Bu bozulmaları düzeltmek için bazı algoritmalar kullanılarak dijital olarak bu sorunlara önlem alınabilmekte ancak bunlar sistemin DRI performansına etki etmek yerine kullanıcıya daha pürüzsüz bir görüntü sunmayı sağlamaktadır.

Günümüzde elektro-optik sensörler birçok alanda kullanılmaktadır. Bu sensörlerin performans parametreleri atmosferik şartlara bağlı olduğu için bir sistem tanımlarken ihtiyaçlar doğrultusunda o sisteme yönelik performans kriterlerini de tanımlama ihtiyacı mevcuttur. Sistem ortaya çıktığında, sistem tasarım aşamasında tanımlanan performans kriterinin doğrulanması gerekmektedir. Ancak elektro-optik tayf, meteorolojik koşullardan doğası gereği fazla etkilendiği için performans kriterlerini doğrulamak zorlaşmaktadır. Performans kriterlerinin doğrulanması aşamasında bu işi zorlaştıran ve belirsizliği artıran parametrelerden biri atmosferik türbülanstır. Bu tez çalışmasında ele alındığı gibi performans kriterlerinin doğrulanması için ilgili zaman/gün'e ait meteorolojik veriler kullanılarak atmosferik türbülans tahmini yapılabilir. Yapılacak atmosferik türbülans tahmini, verilerin doğrudan tahmin modeline yerleştirilmesi ile yapılabileceği gibi, derin öğrenme algoritmalarının elde edilen görüntülerle eğitilerek daha sonraki aşamada piksel bazlı bozulmalardan faydalanarak otomatik olarak atmosferik türbülans tahmini yapılabilir (Gao ve diğ., 2023). Böylece atmosferik türbülans tahmini/yaklaşımı/ölçümü kaynaklı yaşanan sorunların azaltılması sağlanabilir, atmosferik türbülans kaynaklı performans kayıplarının gözlenmesi ve önüne geçilmesi kolaylaşabilir.

KAYNAKLAR

Andrews, L.C., Phillips, R. L., Hopen, C.Y. (2001). Laser beam scintillation with applications. *SPIE Press, (99),* ABD.

Birnir, B. (2013). The Kolmogorov-Obukhov Theory of Turbulence. *Springer*, New York, NY.

Charnotskii, M. (2021). Passive scintillometer: theory and field measurements. *Journal of the Optical Society of America A. (2),* (1-16).

Ci-Yin, Y., Li-Hua, C., Jian-Ping, Z., Ming, L. (2010). Infrared signature measurement of targets accounting for atmospheric attenuation. *International Conference on Computer, Mechatronics, Control and Electronic Engineering, IEEE, (Vol. 4)* 301-303.

Clifford, S.F. (1978). The classical theory of wave propagation in a turbulent medium. *Laser Beam Propagation in the Atmosphere, 25,* 9-43.

Davies, R.I., Kasper, M.E. (2012). Adaptive Optics for Astronomy. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics, 50,* 305-351.

Dinstein, I., Zoabi, H., Kopeika, N.S. (1988). Prediction of effects of weather on image quality: preliminary results of model validation. *Applied Optics, 27(12),* 253–254.

Driggers, R., Hodgkin, V., Vollmerhausen, R. (2013). What good is SWIR? Passive day comparison of VIS, NIR, and SWIR. *Proc SPIE, 8706.*

Dudzik, M.C., Accetta, J.S., Shumaker, D.L. (1993). Electro-Optical Systems Design, Analysis and Testing, Dudzik (Ed.). *The Infrared & Electro-Optical Systems Handbook (Volume 4)*(152-156).SPIE Press.

Gao, S., Liu, X., Chen, Y., Jiang, J., Liu, Y., Jiang, Y. (2023). Atmospheric Turbulence Strength Estimation Using Convolution Neural Network. *IEEE Photonics Journal*, 1-8.

Garlińska, M., Pregowska, A., Masztalerz, K., Osial, M. (2020). From Mirrors to Free-Space Optical Communication-Historical Aspects in Data Transmission. *Future Internet, 12(11),* 179.

Glavaš, H., Bobic, T., Dorić, D., Bozic Lenard, D. (2018). Infrared thermography camera protection in dairy farming management. *Computers and Electronics in Agriculture, (157),* 604-615.

Gupta, M. (2008). Radar Revisited (review of "*Radar Handbook, 3rd ed.*" by Merrill Skolnik) [Book Reviews], *9(4),* 129-130. *IEEE Microwave Magazine*.

Hou, Fujin., Zhang, Yan., Zhou, Yong., Zhang, Mei., Bin, Lyu., Wu, J. (2022). Review

on Infrared Imaging Technology. *Sustainability, 14(18),* 11161.

Hudcova, L., Wilfert, O. (2017). Prediction of atmospheric turbulence on the basis of weather conditions. *Conference on Microwave Techniques (COMITE)*, Brno, Çek Cumhuriyeti, 20-21 Nisan 2017.

Hulea, M., Tang, X., Rajbhandari, S. (2016). A review on effects of the atmospheric turbulence on laser beam propagation An analytic approach. *10th International Symposium on Communication Systems, Networks and Digital Signal Processing,* Prag, Çek Cumhuriyeti, 20-22 Temmuz 2016.

Irwin, A. (2018). Performance prediction from EO system measurements using IRWindows and NV-IPM. In Infrared Imaging Systems: Design, Analysis, Modeling, and Testing. *XXIX SPIE. (Vol. 10625*).

Jassim, J., Khribet, H., Ali, R. (2015). Determine the optical turbulence parameter (Cn) in Babylon City-Iraq. *International Journal of Engineering and Technology, 5,* 221-226.

Jin, D., Chen, Y., Lu, Y. (2021). Neutralizing the impact of atmospheric turbulence on complex scene imaging via deep learning. *Nat Mach Intell 3,* 876–884.

Kleissl, J., Gomez, J., Hong, S.H., Hendrickx, J.M.H., Rahn, T., Defoor, W.L. (2008). Large Aperture Scintillometer Intercomparison Study. *Boundary-Layer Meteorology, 128,* 133–150.

Kopeika, N.S., Kogan, I., Israeli, R., Dinstein, I.H. (1990). Prediction of image propagation quality through the atmosphere: the dependence of atmospheric modulation transfer function on weather. *Optical Engineering, 29(12),* 1427-1438.

Künzner, N., Kushauer, J., Katzenbeißer, S., Wingender, K. (2010). Modern electro-optical imaging system for maritime surveillance applications. *International WaterSide Security Conference*, Carrara, İtalya, 3-5 Ekim 2010.

Lahiri, B.B., Subramaniam, B., Jayakumar, T., Philip, J. (2012). Medical applications of infrared thermography A review. *Infrared Physics & Technology, (55),* 221-235.

Osborn, J., Föhring, D., Dhillon, V., Wilson, R. (2015). Atmospheric Scintillation in Astronomical Photometry. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 452*.

Richardson, P., Driggers, R. (2006). Atmospheric turbulence effects on 3rd generation FLIR performance In Infrared Imaging Systems: Design, Analysis, Modeling, and Testing . *XVII, SPIE. (6207),* 59-69.

Ross, V., Dion, D., St-Germain, D. (2012). Experimental validation of the MODTRAN 5.3 sea surface radiance model using MIRAMER campaign measurements. *Applied optics, 51(13),* 226-227.

Sadot, D., Kopeika, N.S. (1992). Forecasting optical turbulence strength on the basis of

macroscale meteorology and aerosols: models and validation. *Optical Engineering, 31,* 200–212.

Spohn, T., Breuer, D., Johnson, T.V. (2014). *Encyclopedia of the solar system (Third edition.)*, Elsevier, (44-51).

Taylor, G.I. (1938). The Spectrum of Turbulence. *Proceedings of the Royal Society of London Series A, 164*, 476–490.

Trichili, A., Cox, M., Ooi, B., Alouini, M.S. (2020). Roadmap to Free Space Optics. *Journal of the Optical Society of America B. 37(11),* 184-201.

Tunick, A. (1998). The Refractive Index Structure Parameter/Atmospheric Optical Turbulence Model: CN2. ADA341685. *US Army Research Laboratory*, 2-18.

Tunick, A., Tikhonov, N., Vorontsov, M., Carhart, G. (2005). Characterization of optical turbulence (Cn2). AD1043164. *US Army Research Laboratory,* 5-30.

Tyson, R.K. (1990). Adaptive optics system performance approximations for atmospheric turbulence correction. *Optical Engineering, 29,* 1165–1173.

URL-1:https://www.noaa.gov/jetstream/atmosphere/layers-of-atmosphere (Ziyaret tarihi: 15 Kasım 2023).

URL-2:https://tua.gov.tr/tr/blog/dunya/dunya-nin-atmosferi-ve-katmanlari. (Ziyaret tarihi: 20 Kasım 2023).

URL-3:https://arxiv.org/abs/2209.01808 (Ziyaret tarihi: 20 Kasım 2023).

URL-4:http://www.ortana.com/new/images/ORTANA/Urunlerimiz/Ortana%20-%20Meteos101%20Weather%20Station.pdf (Ziyaret tarihi:1 Mayıs 2024)

Wei, T., Willmarth, W.W. (1989). Reynolds-number effects on the structure of a turbulent channel flow. *Journal of Fluid Mechanics, 204,* 57–95.

Whiteman, C. (2000). An Introduction To The Atmosphere Whiteman (Ed). *Mountain Meteorology Fundamentals and Applications(2nd ed.)*(115-124). Oxford University Press.

Wyngaard, J.C., Lemone, M.A. (1980). Behavior of the Refractive Index Structure Parameter in the Entraining Convective Boundary Layer. *Journal of the Atmospheric Sciences, 37(*7), 1573-1585.

Xu M., Shao S., Weng N., Zhou L., Lıu Q., Zhao Y. (2021). Atmospheric Optical Turbulence Characteristics Over the Ocean Relevant to Astronomy and Atmospheric Physics. *Applied Sciences, 1054 (11*), 1-13.

Yıldız F. (2017). Atmosferik türbülans koşullarının lazer ışınının yayılımına etkisinin incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi, Fen

Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 476688.

Zaman, K.B.M.Q., Hussain, A.K.M.F. (1981). Taylor hypothesis and large-scale coherent structures. *Journal of Fluid Mechanics, 112*, 379–396.

Zhu, X., Milanfar, P. (2012). Removing atmospheric turbulence via space-invariant deconvolution. IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence, *35(1)*, 157-170.

KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER

Aktan B.F., Kaçar E., (2024), "Deniz Ortamında Atmosferik Türbülansın Elektro-Optik Keşif Görüntüleme Sistemleri Üzerindeki Etkisi ve Atmosferik Türbülans Tahmini", *3. Uluslararası Topkapı Kongresi*, İstanbul 01-02 Mayıs 2024.

ÖZGEÇMİŞ

İlk, orta ve lise eğitimini Aksaray'da tamamladı.2013 yılında Sivas Cumhuriyet Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliği bölümüne başladı ve 2018 yılında lisans eğitimini tamamladı. 2021 yılında Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektro-optik Sistem Mühendisliği bölümünde başladığı yüksek lisans eğitimine halen devam etmektedir. 2019 yılı Kasım ayından beri Deniz Kuvvetleri Araştırma Merkezi Komutanlığı'nda Elektro-optik Araştırma Mühendisi olarak çalışmaktadır.