

**ATMOSFERİK GEÇİRGENLİĞİN GECE GÖRÜŞ SİSTEMLERİNE ETKİSİNİN
İNCELENMESİ**

Çetin Alp AKDOĞAN

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**HAZİRAN 2006
ANKARA**

**ATMOSFERİK GEÇİRGENLİĞİN GECE GÖRÜŞ SİSTEMLERİNE ETKİSİNİN
İNCELENMESİ**


Çetin Alp AKDOĞAN

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

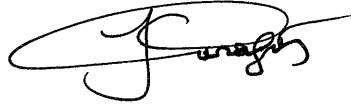
**HAZİRAN 2006
ANKARA**

Çetin Alp AKDOĞAN tarafından hazırlanan ATMOSFERİK GEÇİRGENLİĞİN GECE GÖRÜŞ SİSTEMLERİNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ adlı bu tezin Yüksek Lisans tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.


Prof. Dr. Müzeyyen SARITAŞ
Tez Yöneticisi

Bu çalışma, jürimiz tarafından Elektrik - Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan : Doç. Dr. İrfan KARAGÖZ



Üye : Prof. Dr. Müzeyyen SARITAŞ (Danışman)

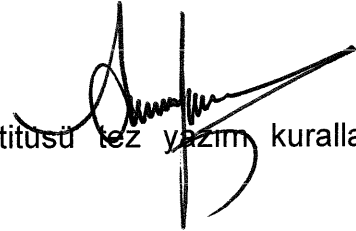


Üye : Doç. Dr. Elif Derya UBEYLI




Tarih : 27.06.2006

Bu tez, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygundur.



TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada orijinal olmayan her türlü kaynağa eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.



Çetin Alp AKDOĞAN

**ATMOSFERİK GEÇİRGENLİĞİN GECE GÖRÜŞ SİSTEMLERİNE
ETKİSİNİN İNCELENMESİ
(Yüksek Lisans Tezi)**

Çetin Alp AKDOĞAN

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
Haziran 2006**

ÖZET

Elektromanyetik spektrum bandında insan gözünün gördüğü bölge görünür bölge olarak adlandırılır. Kızılötesi (Infrared-IR) bölge elektromanyetik spektrum bandı içerisinde, insan gözünün algılayabileceği görünür kırmızının hemen ötesinde bulunan bir bölgedir. Sıcaklığı mutlak sıfırın (0 Kelvin, -273 °C) üzerindeki tüm cisimler kızılötesi enerji yayar. Cisimlerin kızılötesinde yaydığı enerjiyi algılamayı sağlayan sistemler “Kızılötesi Termal Görüntüleme Sistemleri” olarak adlandırılmıştır. Bu sistemler sayesinde havanın karanlık olduğu zamanlarda dahi termal olarak görüntü alınabilmektedir. Genelleştirilmiş bir termal görüntüleme sistemi 6 alt sistemden oluşur. Bunlar kaynak, arka plan, atmosferik ortam, optik aksamlar, dedektör ve sinyal işlemedir. Termal sistemlerin performansını bu 6 sistem belirler. Bu çalışmada, atmosferik ortamda bulunan gazların termal sistemin performansına etkisi incelenmiştir. Atmosferde bulunan gazların mekanizmaları incelendiğinde geçirgenliğin en fazla olduğu bölgenin 8–12 µm dalga boyu aralığı olduğu ve geçirgenliği en çok etkileyen gazın ise su buharı olduğu görülmüştür. Bu nedenle, su buharının 8–12 µm bandında geçirgenliğe etkisi incelenmiştir. Buradaki çalışmalar Kara Kuvvetleri Komutanlığı envanterinde bulunan AN/TAS-4A Gece Görüş Cihazı ile ilk olarak Elektro-Optik Sistemler Bakım Merkezi

Müdürlüğü'nde daha sonra da Aselsan A.Ş.'nde yapılmıştır. Bu çalışmada, ortamın sıcaklığı ve nemi değiştirilerek termal sistemdeki yükselteç ve dedektör çıkış voltajı ölçülmüştür. Yapılan çalışmalar sonucunda 20 derece sıcaklıkta, bağıl nem %60 arttıkça atmosferik geçirgenliğin % 13,26 azaldığı görülmüştür. Sonuçlar literatürle uyumludur.

Bilim Kodu : 905.1.035
Anahtar Kelimeler : Atmosferik geçirgenlik, termal kamera, dedektör
Sayfa Adedi : 90
Tez Yöneticisi : Prof.Dr.Müzeyyen SARITAŞ

**INVESTIGATION OF THE EFFECT OF ATMOSPHERIC TRANSMISSION
ON NIGHT VISION SYSTEMS**

(M.Sc.Thesis)

Çetin Alp AKDOĞAN

**GAZİ UNIVERSITY
INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY**

June 2006

ABSTRACT

The electromagnetic spectrum band which can be seen by human beings is classified as visible region. Infrared (IR) region is a region inside the electromagnetic spectrum band, far away from the visible red. All substances which have temperature above absolute zero (0 Kelvin, -273 °C) emit radiation. Systems which sense the radiation at infrared region are called "Infrared Thermal Vision Systems". By the help of these systems thermal visions can be detected even at dark atmosphere. A generalized infrared system has 6 sub systems. These sub systems are; source, background, atmospheric region, optical devices, detector and signal processing. This 6 sub systems determine the performance of thermal systems. In this study, effects of the atmospheric gases to thermal vision systems are investigated. When the gas mechanisms are investigated, it is seen that the highest transmission is at 8–12 μm wave length region and the most effective gas which decreases the transmission is water vapor. For this reason, effect of water vapor at 8–12 μm band is investigated. Experimental studies were done using AN/TAS-4A Night Vision Device which is in the inventory of the Land Forces Command at Electro-Optical Systems Maintenance Center and then at Aselsan Company. In this study, the output voltage of the detector in the thermal vision system were

measured to investigate the effect of temperature and humidity variation of atmospheric transmission. It was observed that when the temperature and humidity of the environment increased, the transmission was decreased. The results were found in agreement with literature.

Science Code : 905.1.035
Key Words : Atmospheric transmission, thermal cameras, detector
Page Number : 90
Adviser : Prof.Dr.Müzeyyen SARITAŞ

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım boyunca değerli yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren hocam Prof. Dr. Müzeyyen SARITAŞ'a, Elektro-Optik Sistemler Bakım Merkezi Müdürlüğü imkanlarının kullanılması için bana izin veren Merkez Müdürü Müh.Alb.Adem ÖZKUZUCU ve Teknik Müdürü Müh.Alb.Onur ENGİN'e, yine Aselsan A.Ş. imkanlarından faydalanmamı sağlayan başta Proje Direktörü Mustafa KAVAL olmak üzere mühendisler Behçet KARATAŞ ve Seçil KINALI'ya, yaptığım deneysel çalışmalarında bana çok yardımcı olan Astsubay Ord.Tekns.Üçvş. Mehmet Ali UZUNKAYA ile Sa.Üc.İşçi Erkan COŞKUN'a, termal dedektörler konusunda bilgilerini benimle paylaşan Yük.Müh.Yzb. Hasan KOÇER'e, manevi destekleriyle beni hiçbir zaman yalnız bırakmayan çok değerli eşim Kıvılcım Neşe AKDOĞAN'a teşekkürü bir borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	vi
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER.....	ix
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	xii
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	xiii
RESİMLERİN LİSTESİ.....	xvi
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xvii
1. GİRİŞ.....	1
2. GECE GÖRÜŞ İÇİN GÖRÜNTÜLEME SİSTEMLERİN TARİHSEL GELİŞİMİ.....	3
2.1. Düşük Işık Seviyesi Teknolojileri.....	3
2.2. Askeri Alanda Çalışmalar.....	5
2.3. Kızılötesi (IR) Termal Görüntüleme Cihazlarının Gelişimi.....	5
3. KIZILÖTESİ TERMAL GÖRÜNTÜLEME SİSTEMLERİ.....	9
3.1. Temel Kavramlar.....	9
3.1.1. Optik spektrum.....	11
3.1.2. Kızılötesi ışınım.....	12
3.1.3. Atmosferik geçirgenlik.....	13
3.2. Basitleştirilmiş Radyometrik Performans Eşitliği.....	14
3.2.1. Termal radyasyon kanunları.....	16
3.2.2. Atmosfer yoluyla iletim.....	19
3.2.3. Optik geçirgenlik.....	20

Sayfa

3.2.4. Dedektör çeşitleri.....	20
3.2.5. Dedektör dizinleri ve odak düzlem matrisi.....	22
4. IŞINIMIN ATMOSFERDE YAYILIMI VE ATMOSFERİK GEÇİRGENLİK PENCELERİ.....	25
4.1. Giriş.....	25
4.2. Atmosferde Işınımın Transferi.....	25
4.3. Yeryüzünün Atmosferi.....	26
4.3.1. Atmosferik yapı.....	27
4.3.2. Atmosferdeki gaz bileşimleri.....	27
4.4. Atmosferik Emilim, Kırılma ve Saçılma	29
4.4.1. Atmosferik gazlar tarafından yapılan emilim.....	29
4.4.2. Atmosferin kırılma etkileri.....	31
4.4.3. Atmosferik saçılma.....	31
4.5. Atmosferik Geçirgenlik Çizelgeleri.....	32
4.5.1. 8-12 µm dalga boyunda su buharı ve karbon dioksitin atmosferik geçirgenliğe etkisinin incelenmesi.....	33
4.5.2. Çeşitli sıcaklık ve nem değerlerinde su buharının atmosferik geçirgenliğe etkisinin analizi.....	34
5. SU BUHARININ ATMOSFERİK GEÇİRGENLİĞE ETKİSİNİN DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ.....	43
5.1. Kara Kuvvetleri Elektro-Optik Sistemler Bakım Merkezi Md. lüğünde Yapılan Çalışmalar.....	43
5.1.1. Deneyde kullanılan cihazlar.....	45
5.1.2. Deney düzeneğinin çalışma prensibi ve deney sonuçları.....	53

Sayfa

5.1.3. Deney sonuçlarının değerlendirilmesi.....	55
5.2. Aselsan A.Ş.'nde Yapılan Deneysel Çalışmalar.....	56
5.2.1. Aselsan A.Ş.'nde yapılan çalışma sonuçlarının değerlendirilmesi.....	58
5.2.2. Aselsan A.Ş. ve EOSBM.Md.lüğünde yapılan deney sonuçlarının karşılaştırılması.....	62
6. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	64
KAYNAKLAR.....	68
EKLER.....	70
EK-1 7,0 µm–13,9 µm dalga boyunda su buharı miktarının çökelti su kalınlığına bağlı olarak atmosferik geçirgenliğe etkisi.....	71
EK-2 7,0 µm–13,9 µm dalga boyunda karbon dioksitin yol uzunluğuna bağlı olarak atmosferik geçirgenliğe etkisi.....	74
EK-3 5-35° C sıcaklıkta bağıl neme bağlı olarak atmosferik geçirgenliğin değişim çizelgeleri.....	77
EK-4 Aselsan A.Ş.'nde yapılan deney çalışması sonucunda ölçülen değerler	80
EK-5 Aselsan A.Ş.'nde yapılan ölçüm sonuçlarına eğri uyumlaması yapıldığında elde edilen değerler.....	83
ÖZGEÇMİŞ.....	90

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 4.1. Kuru atmosferde bulunan standart gaz miktarları.....	29
Çizelge 4.2. Atmosferik gazların değışken miktarları.....	30
Çizelge 4.3. Yükseklik ile su buharı ve karbon dioksitin değışimi.....	35
Çizelge 4.4. 8–12 µm dalga boyu aralığında çökelti su miktarlarına göre atmosferik geçirgenlik değerleri.....	37
Çizelge 4.5. 5° C–35° C sıcaklık aralığında doğrusal eğri uyumlama sonrası değerler.....	41
Çizelge 5.1. Deney sonucunda değışik bağıl nem değerleri için elde edilen yükselteç çıkış tepe gerilimleri.....	54

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 3.1. Optik spektrum.....	11
Şekil 3.2. Kızılötesi ışınım.....	13
Şekil 3.3. Atmosferik geçirgenlik.....	14
Şekil 3.4. Genelleştirilmiş kızılötesi sistem.....	15
Şekil 3.5. T=500 K sıcaklıktaki siyah cisim için Planck grafiği.....	17
Şekil 3.6. Dedektör çeşitleri.....	22
Şekil 4.1. Dikey olarak tabakalara ayrılmış olan ortamda ışınımın azalması.....	26
Şekil 4.2. Yükseklik ile atmosferin yapısı.....	28
Şekil 4.3. Bağıl nem ve sıcaklığa bağlı olarak çökelti su miktarının değişimi.....	38
Şekil 4.4. 8–12 µm dalga boyu aralığında çökelti su-atmosferik geçirgenlik grafiği (eğri uyumlama yapılmış, R-square=0,9997).....	39
Şekil 4.5. 5° C–35° C sıcaklık aralığında eğri uyumlama yapılmış atmosferik geçirgenliğin bağıl nem ile değişimi grafiği.....	42
Şekil 5.1. EOSBM.Md.lüğünde kullanılan deney düzeneğinin bağlantı şeması.....	44
Şekil 5.2. AN/TAS-4A gece görüş cihazı genel çalışma prensibi blok şeması.....	48
Şekil 5.3. AN/TAS-4A gece görüş cihazı genel çalışma prensibi.....	49
Şekil 5.4. Gece görüş cihazı dedektör ve soğutucusu.....	50
Şekil 5.5. Test edilen cihaz (UUT) monte sehpası.....	51
Şekil 5.6. Işık demetinin izlediği optik yol.....	51
Şekil 5.7. Sıcaklık kontrolü ve hedef kaynağı takımının blok diyagramı.....	52

Şekil	Sayfa
Şekil 5.8. 20 ° C sıcaklıkta değişik bağıl nem değerleri için elde edilen yükselteç çıkış tepe gerilimleri grafiği (eğri uyumlama yapılmış, R-square=0,8845).....	54
Şekil 5.9. Aselsan A.Ş.'nde kullanılan deney düzeneğinin blok diyagramı.....	59
Şekil 5.10. Tüm sıcaklık değerleri için eğri uyumlama yapılmış bağıl nem – dedektör çıkış gerilim grafiği.....	61
Şekil 5.11. Tüm sıcaklık değerleri için eğri uyumlama yapılmış bağıl nem – önyükselteç çıkış gerilim grafiği.....	61
Şekil 5.12. Tüm sıcaklık değerleri için eğri uyumlama yapılmış bağıl nem – yükselteç çıkış gerilim grafiği.....	62

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 5.1. Elektro-Optik Sistemler Bakım Merkezi Müdürlüğünde kullanılan deney düzeneği.....	45
Resim 5.2. ACS WZH 13-B2 model iklimlendirme kabini.....	57
Resim 5.3. Aselsan A.Ş.'nde yapılan deney için kurulan düzenek.....	60

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış bazı simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklama
° C	Celsius derece
° K	Kelvin derece
AN/TAS-4A	TOW silah sistemi gece görüş cihazı
AN/TAM-3A	AN/TAS-4A test ekipmanı
H ₂ O	Su buharı
Si	Silisyum
InSb	İndiyum antimon
Cd	Kadmiyum
HgCdTe	Civa kadmiyum tellür
PbSnTe	Kurşun kalay tellür
CO ₂	Karbon dioksit
PtSi	Platin silisyum
SiO ₂	Silisyum dioksit
O ₃	Ozon
CO	Karbon monoksit
Kısaltmalar	Açıklama
IR	Kızılötesi
EOSBM.Md.lüğü	Elektro-Optik Sistemler Bkm. Mrk.Md.lüğü
K.K.K.İığı	Kara Kuvvetleri Komutanlığı
FPA	Odak düzlem matrisi
TIS	Termal görüntüleme sistemi
FLIR	İleri görüş kızılötesi

Kısaltmalar	Açıklama
LOWTRAN	Düşük çözünürlüklü geçirgenlik kodu
MODTRAN	Orta çözünürlüklü geçirgenlik kodu
DC	Doğru akım
CCD	Yüklü çiftlenmiş aygıtlar
VIS	Görünür bölge
SWIR	Kısa dalga boyu kızılötesi
MWIR	Orta dalga boyu kızılötesi
LWIR	Uzun dalga boyu kızılötesi
VLWIR	Çok uzun dalga boyu kızılötesi
UV	Morötesi
MOS	Metal oksit yarı iletken
ABD	Amerika Birleşik Devletleri
ROIC	Okuma entegre devre
HITRAN	Yüksek çözünürlüklü veri atlası
AH	Mutlak nem
AH_{sat}	Doymuş mutlak nem
RH	Bağıl nem
MATLAB	Matematik laboratuvarı
TOW	Tüpten atılan optik takip edilen tel güdümlü
LED	Işık yayan diyot
UUT	Test edilen cihaz
QWIP	Kuantum kuyu kızılötesi fotodedektörler

1. GİRİŞ

Elektromanyetik spektrum bandı, dalga boylarına göre üç bölgeye ayrılır. Bunlar, morötesi bölge (0,4 mikrometreden küçük dalga boyları), görünür bölge (0,4–0,7 mikrometre arası dalga boyları) ve kızılötesi bölge (0,7 mikrometreden büyük dalga boyları)'dir.

Sıcaklığı mutlak sıfırın (0 Kelvin, -273 °C) üzerindeki tüm cisimler kızılötesi enerji yayar. Cisimlerin kızılötesinde yaydığı enerjiyi algılamayı sağlayan sistemler "Kızılötesi Termal Görüntüleme Sistemleri" olarak adlandırılmaktadır. Bu sistemler sayesinde, gece karanlığında termal görüntü alınabilmektedir. Söz konusu sistemlerin ağırlıklı olarak askeri uygulamalarının yanı sıra sağlık uygulamaları (kanser araştırması, kan akışı, kas performansı), endüstriyel uygulamaları (yüksek gerilim hattının termal görüntüsü, dönen elektrik motorunun görüntüsü), ticari uygulamaları (sigorta elemanlarının termal görüntüsü) ile güvenlik ve keşif uygulamaları (arama-kurtarma, orman yangını izleme, çevre ve nokta emniyeti) mevcuttur.

Kızılötesi görüntüleme sisteminin performansını etkileyen altı temel faktör bulunmaktadır. Bunlar;

- Kaynak
- Arka plan
- Atmosferik ortam
- Optik kısımlar
- Dedektör
- Sinyal işleme

Sistem tasarımı yapılırken bu altı faktörün termal görüntüye etkisi incelenmelidir. Kaynak ile arka plan arasındaki sıcaklık farkı; elektromanyetik spektrum bandı içerisinde bulunan kızılötesi pencereler ile ortamdaki gazların ve mesafenin atmosferik geçirgenliğe olan etkileri; kullanılan cam

materyallerin kızılötesi radyasyon geçirgenliği çok önemlidir. Ayrıca, dedektör tasarımında kullanılan yarı iletken malzemenin cinsi ve yapısı da önem kazanmaktadır.

Bu çalışmanın 2 nci kısmında, gece görüş cihazlarının tarihsel gelişimi ile ilgili bilgiler verilmiştir. 3 ncü kısmında kızılötesi termal görüntüleme temel kavramları ve sistem tipleri, 4 ncü kısımda ise ışınımın atmosferdeki yayılımı ve atmosferik geçirgen pencereler detaylı olarak incelenmiştir. Özellikle su buharının (H_2O), elektromanyetik spektrum bandında, kızılötesi dalga boylarında bazı bölgelerin geçirgenliğine olan etkileri ve kızılötesi termal dedektör tasarımlarının neden 8–12 μm bandı ile 3–5 μm bandında yapıldığı araştırılmıştır.

Bu çalışmanın 5 nci kısmında, Kara Kuvvetleri Komutanlığına bağlı olarak elektro-optik sistemlerin bakım ve onarımını yapmaktan sorumlu bulunan Elektro-Optik Sistemler Bakım Merkezi Müdürlüğünde (Yenikent/ANKARA) bulunan 8–12 μm dalga boyunda çalışan bir termal kamera kullanılarak değişik nem ve sıcaklık değerlerinde ölçümler yapılmıştır. Alınan termal görüntülerde bozulmalar tespit edilmiş, ancak görüntüler ölçülebilir değerlerle ifade edilemediğinden, literatürde bulunan çalışmalarla karşılaştırma yapabilmek maksadıyla su buharı ile sıcaklığın, termal kamera çıkış voltajına etkileri incelenmiştir. Termal kameradan alınan çıkış voltajları analiz edilerek, literatürde bulunan sonuçlar ile karşılaştırılmış ve sonuçlar 6 ncü kısımda irdelenmiştir.

2. GECE GÖRÜŞ İÇİN GÖRÜNTÜLEME SİSTEMLERİNİN TARİHSEL GELİŞİMİ

Gece görüş cihazlarının ilk gelişimi görüntü yoğunlaştırıcı tüplerin kullanıldığı pasif gece görüş görüntüleme cihazları ile başlamıştır. Bu cihazlarda amaç belli bir ışık kaynağından gelen ışığın hedeften yansımaları ile elde edilen ışığın görüntü yoğunlaştırıcı tüpler ile yoğunlaştırılarak görüntünün elde edilmesi prensibine dayanmaktadır. Ancak bu tip sistemler için ortamda mutlaka bir ışık kaynağı olması gerektiğinden, karanlık gecelerde ve hava koşullarının uygun olmaması (sisli, bulutlu havalarda) durumunda görüntü alınması çok zor olmaktadır. Bu sebeple daha sonraki yıllarda sıcaklığı 0 derece Kelvin'den daha sıcak olan cisimlerin yaydığı radyasyonu algılayan termal görüntüleme sistemleri geliştirilmiştir. Bu kısımda, önce görüntü yoğunlaştırma teknolojilerinin daha sonra da termal dedektörlerin tarihsel gelişimleri hakkında bilgi verilecektir.

2.1. Düşük Işık Seviyesi Teknolojileri

Düşük ışık seviyesi teknolojisi 1903'ü yıllarda, bugünden çok da farklı olmayan görüntü yoğunlaştırma kavramı ile başlamıştır. İlk görüntü yoğunlaştırıcılar net kazancı birden daha az olan ışık yükselteçleridir.

Görüntü yoğunlaştırıcıların tarihsel gelişimi, sinyal üreteçleri veya kamera tüplerinin tarihsel gelişiminden ayrılmamalıdır. Bu konulara ilgi, 1920'li yıllarda elektro-optiğin formülize edilmesinden hemen sonra başlamıştır. Bu ilk çalışmalar televizyon kamera tüplerinin hassasiyetinin artırılması problemi için elektron görüntülemesinin uygulaması olarak başlamıştır. Görüntü tüpleri ile ilgili ilk makaleler 1930'lu yılların ortalarında Holts, de Boer, Teves ve Veenemans, Bruche ve Shaffernicht, Zworykin ve Morton, Heimann ve diğerleri tarafından yayımlanmıştır [1]. Bu yayınlarda anlatılan görüntü tüpleri genellikle yarı geçirgen katot kullanan tek basamaklı dönüştürücü tüplerdir.

Bunların yakın kızılötesi radyasyonuna olan hassasiyetleri o zamanki ilgi alanlarından biridir. Birbirini takip eden basamaklardan oluşan görüntü yoğunlaştırma kavramı da bu dönemde bu alanda çalışan birçok kişi tarafından önerilmiştir. Bu konudaki ilk patent Barthelemy ve Leithine tarafından 31 Ağustos 1936 tarihinde alınmıştır (French Patent No.802244) [1].

İkinci Dünya Savaşı esnasında, kızılötesi görüntü elde etmek amacıyla görüntü dönüştürücü tüplerin geliştirilmesi için birçok çaba sarf edilmiştir. İkinci Dünya Savaşını takip eden dönemde görüntü yoğunlaştırıcılar üzerindeki araştırmalar hız kazanmıştır. İnce bir cam veya bir tarafı fosfor bir tabaka diğer tarafı ise foto katot ile kaplı bir mikadan oluşan yoğunlaştırıcı ekrandan elde edilen akım kazancı geliştirilmesi araştırmaları 1941 yılında başlamıştır. Bu prensip ile çalışan ilk pratik görüntü yoğunlaştırıcı 1949 yılında tamamlanmıştır [1].

Sternglass tarafından yapılan çalışmalar sonucunda görüntü yoğunlaştırma için ikincil yayılımın geçirgenliği mümkün hale gelmiştir [1]. Sternglass bu çalışmasıyla, alüminyum oksit tarafından desteklenen potasyum klorid tabakaları, 6 ila 8 kV'luk birincil elektron tarafından sıkıştırıldığında 8 veya 10 ikincil elektron kazanç elde etmeyi başarmıştır. Üçüncü bir tip yoğunlaştırıcı olan ve o dönemde çok az bir ilgi gören ancak günümüzde hatırı sayılır bir ün kazanan, bugün genellikle mikro kanal tabaka yoğunlaştırıcı olarak ta isimlendirilen, ikincil yayılım yoğunlaştırıcılarıdır [1].

Yoğunlaştırıcı çalışmalarında en son yapılan hatırı sayılır bir gelişme de fiber optik alanında yapılan geliştirmelerdir. Fiber optik alanında yapılan çalışmalar optik alanında faaliyet gösteren firmalar tarafından desteklenmektedir [1].

2.2. Askeri Alanda Çalışmalar

Askeri alandaki en önemli gelişmelerden birisi, gündüz muharebe yeteneğine ilave olarak gece koşullarında da muharebe yeteneğinin kazanılmasıdır. Bu sebeple gece görüş potansiyelinin askeri alanlarda kullanılması kaçınılmazdı. Bunun sonucu olarak gece görüş çalışmalarındaki en önemli laboratuvarlar askeri araştırma ve geliştirme laboratuvarları olmuştur.

Askeri kızılötesi uygulamaları ilk olarak 2 nci Dünya Savaşı ile birlikte başlamıştır. Özellikle termal görüntülemenin amaçlandığı şekilde kullanılabilmesi için çok büyük teknolojik geliştirmelerin yapılması kaçınılmazdı. Kızılötesi uygulamalar ilk olarak başladığı radyometrik aygıtlar ile havadan havaya atılabilen füze arayıcı başlıklarında kullanılmıştır. O zamanlardaki en önemli kullanım alanı havadan havaya atılabilen füzeler olduğundan dolayı ilk müşterileri Deniz ve Hava Kuvvetleri olmuştur. Bu çabalar dedektör geliştirme çabalarını ateşlemiş ve 1952 yılında hükümet-endüstri işbirliği ile Güdümlü Füze Kızılötesi Konferansı düzenlenmiştir. 4 yıl süren gizli çalışmalar sonucunda kapsam daha da genişletilerek, 1956 yılında bugünde faaliyetleri sürdüren diğer firmaların katılımı ile Kızılötesi Bilgi Sempozyumu düzenlenmiştir [1].

1960'lı yıllarda kızılötesi teknolojisinin gece görüş cihazları için kullanılması çalışmalarına başlanmıştır. Bu dönemde, düşük ışık seviyesinde çalışan görüntü yoğunlaştırıcı pasif gece görüş cihazlarına fazla önem verilmesinden dolayı, termal sistemlerin gelişimi çok yavaş olmuştur. Bu gelişmelerden sonra Kara Kuvvetleri en önemli kullanıcı olmuştur.

2.3. Kızılötesi (IR) Termal Görüntüleme Cihazlarının Gelişimi

IR dedektörler ilk olarak 1950'li yıllarda hava savunma silah sistemlerinin (REDEYE vb.) arayıcı başlıklarında (SEEKER) kullanılan tek elemanlı ve soğutmalı kurşun tuzu tabanlı (PbS, PbSe vb.) olarak imal edilmiştir. İlk

katkılı fotoiletken dedektörler 1950'lerin başlarında ortaya çıkmıştır. İlk yüksek performans katkılı dedektörler germanyumun katkılanması ile yapılmıştır. Germanyumun bakır, çinko ve altın ile katkılanmasından 8–14 μm uzun dalga boyu kızılötesi ışınım spektrum penceresinden 14 μm -30 milimetre (30000 μm) çok uzun dalga boyu kızılötesi ışınım bölgesine kadar kullanılabilen dedektörlerin yapılması araştırılmıştır. Katkılı fotoiletkenler, 10 μm dalga boyu ötesinde oldukça yaygın olarak kullanılarak katkısız foto dedektörlerin gelişimine öncülük etmiştir. Katkılı fotoiletkenlerin katkısız dedektörlere benzer şekilde iyi performans elde etmek için çok düşük sıcaklıklarda çalıştırılma zorunluluğu vardır.

Katkılı Si, on yıllık bir duraklamadan sonra, Boyle ve Smith [2] tarafından CCD'ler (charge-coupled devices) keşfedildikten sonra yeniden dikkate alınmıştır. 1973 yılında, Shepherd ve Yang [3] metal-silisyum/silisyum Schottky bariyer dedektörlerini önerdi ve böylece ilk kez hem dedektör hem de okuma devresi aynı silikon çip üzerinde yapılabilirdi.

Dar bant aralıklı yarı iletkenlerde hızlı ilerlemeler gerçekleştirildi ki, bunlar ilerleyen yıllarda dalga boyunun genişletilmesinde ve hassasiyetin artırılmasında kullanılmıştır. III-V (Periyodik tablonun III ncü sütunundaki atomun V nci sütundaki atomla yaptığı bileşik demektir) bileşik yarı iletken ailesine yakın ilk malzeme InSb olmuştur.

1959 yılında araştırmacı Lawson ve çalışma arkadaşları [4] enerji bant aralığı Cd (Kadmiyum) mol oranı-x'e bağlı olarak değiştirilebilen $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ (HgCdTe veya *MCT* yani Mercury Cadmium Telluride) kızılötesi dedektör teknolojisini keşfetmiştir. İlk makalelerinde HgCdTe malzemesinin fotoiletken ve foto voltaik algılamalarda 12 μm dalga boyuna kadar çalışabildiğini rapor etmişlerdir. Hemen sonrasında, Amerikan Hava Kuvvetlerinin kontrolünde 77 K (-196 °C) sıcaklıkta çalışan 8-12 μm bant aralığında algılama yapan HgCdTe (MCT) kızılötesi dedektör üretim projesi başlatılmıştır. Çalışmalar

Honeywell Araştırma Merkezinde geliştirilen HgCdTe için modifiye edilmiş Bridgman kristal büyütme tekniği ile yapılmıştır. Daha sonra fotoiletken ve foto voltaik olarak algılama yapan ilk basit HgCdTe dedektörleri yapılmıştır [5]. MCT dar enerji bant aralıklı (narrow-gap) yarı iletkenlerin temel özellikleri (yüksek optiksel soğurma katsayısı, yüksek elektron mobilitesi ve düşük termal gürültü oranı) ve enerji bant aralıklarının kolaylıkla değiştirilebilir olmasıdır. HgCdTe teknolojisi IR uygulamaları için yaygın olarak kullanılmıştır.

1970'li yıllarda taramalı (30x1, 60x1, 120x1 vb.) termal görüntüleme sistemlerinin hızlı cevap alabilme özelliğine ihtiyaç duyulmuştur. Böylece taranan görüntünün tarama yönünde bozulmaması sağlanmaktaydı. Günümüzde dedektör teknolojisi taramasız sistemler yönünde ilerlediğinden, taramasız dedektör dizinlerinde (128x128, 320x240, 640x512 vb.) çok hızlı cevap alma özelliğine ihtiyaç, eski taramalı sistemlerdeki kadar değildir.

Malzeme teknolojisi öncelikli olarak askeri uygulamalarda gelişmiş olup, halen devam etmektedir. Amerika, Vietnam savaşından dolayı, askeri birimlerini, insanlardan, binalardan ve arazi araçlarından gelen termal yayılımları görüntüye çevirebilecek kızılötesi sistemlerinin gelişimine yönlendirmiştir. İlk nesil, doğrusal dizin foto iletken dedektörler olup, oldukça fazla miktarda üretilip günümüzde en yaygın kullanılanlardır. İkinci nesil (2-D), iki boyutta foto voltaik dedektörler olup, yüksek oranda üretime sahiptir. Üçüncü nesil aygıtlar; birden fazla bant aralığında algılama kabiliyeti (3–5 μm / 8–12 μm) olan dedektör yapılarıdır ve hali hazırda demonstrasyon programı statüsündedirler [6].

Günümüzde, HgCdTe malzemesi bant aralığı değiştirilebilen ve en fazla kullanılan foto dedektör malzemesidir. Yıllar geçtikçe, katkılı silikon ve kurşun kalay telerüd (PbSnTe) aygıtlarının tamamını saf dışı bırakmayı başarmıştır. Fakat buna rağmen günümüzde daha öncelerden farklı olarak rakip

teknolojiler artmaktadır (Örneğin QWIP (Kuantum kuyu kızılötesi fotodedektörler) teknolojisi) [6].

Termal görüntüleme ikinci büyük değişim hali hazırdaki çalışmalarla sürdürölmektedir. Soğutmasız kızılötesi matrislerinin gelişmesi ve görüntülemenin oda sıcaklığında gerçekleştirilebilmesi teknolojik gelişmenin üst noktalarından biridir.

Birçok araştırmacı, hem hibrit hem de monolitik soğutmasız dizinler üzerine odaklanmış olup pirometrik ve bolometrik dedektör dizinlerinin algılamalarında olağan üstü verim almışlardır. Askeri sistemler ve ticari amaçlı soğutmasız odak düzlem matrisli (Focal Plane Array: FPA) dedektör üretim ve geliştirme lisansını Honeywell firması birkaç şirkete vermiştir. Hali hazırda 320x240 yapıda mikrobolometre kameraları Raytheon, Boeing ve Lockheed-Martin şirketleri tarafından Amerika Birleşik Devletleri'nde üretilmektedir [7].

3. KIZILÖTESİ TERMAL GÖRÜNTÜLEME SİSTEMLERİ

3.1. Temel Kavramlar

Termal Görüntüleme Sistemleri (Thermal Imaging System – TIS) için genellikle kullanılan bir ifade İleri Görüş Kızılötesi (Forward Looking Infrared-FLIR) ifadesinin kısaltması olan FLIR'dır. Bununla birlikte en iyi tanımlama “Elektromanyetik radyasyon görüntüyü elektriksel geometrik biçime çeviren aygıt” olarak yapılabilir.

Normal görüntüler, bir cisimden meydana gelen yansımaların değişimi ile oluşur. Bu görüntülerin oluşması için doğal veya suni harici bir ışık kaynağı gereklidir. Bunun aksine termal görüntüler bir cisimden doğal olarak yayılan radyasyondaki değişim ile oluşur.

Termodinamiğin temel özelliği gereği, tüm maddeler doğal olarak elektromanyetik radyasyon yayar ve emerler. Bu temel ilişki, en iyi Planck radyasyon kanunu ile açıklanabilir. Max Planck (1858–1947), radyasyonu, dalga boyu ve Kelvin cinsinden sıcaklığın bir fonksiyonu olarak ifade etmiştir. Max Planck, kuantum teorisinin temelini oluşturan bu çalışmaları ile 1918 yılında Nobel ödülü almıştır [8].

Tüm cisimler oda sıcaklığında (300 K) bile büyük miktarda güç yayarlar. Mükemmel yayıcı cisimler siyah cisim (black body) olarak tanımlanırlar. Siyah cisimler, 300 K sıcaklıkta, tüm dalga boylarında 450 W / m^2 güç yayarlar. Tabii ki tüm cisimler siyah cisim değildir. Bu sebeple, bir cismin yaydığı gücün aynı sıcaklıkta aynı spektrum aralığında siyah cismin yaydığı güce oranı yayılma (emissivity) olarak tanımlanır. Buradan, cisimlerin radyasyon yayılmalarındaki değişimlere bağlı olarak diferansiyel bir radyasyon olduğu çıkartılabilir. Sonuç olarak görünür bölgedeki cisimlerden meydana gelen yansıma farkları, kızılötesi bölgede hem sıcaklık hem de yayılma değişimleri olarak

tanımlanabilir. Her iki durumda da alınan görüntü radyasyonu “sinyal” olarak kabul edilirler.

Atmosfer geçirgenliğindeki kayıplar sebebiyle, görünür veya kızılötesi, hiçbir tip dedektör ile yansıyan ya da yayılan tüm radyasyon değişimlerini algılayamayız. Bu olay, çalışma aralıkları olarak tanımlanan bölgelerin tanımlanmasına sebep olur. Kızılötesi bölgesinde bilinen iki temel çalışma aralığı vardır: birincisi 3 – 5 μm aralığı olan orta dalga boyu kızılötesi çalışma aralığı, diğeri ise 8–12 μm aralığı olan uzun dalga boyu kızılötesi çalışma aralığıdır. Normal sıcaklıkta siyah cismin radyasyon yayılımının tepe seviyesine 10 μm dalga boyu civarlarında ulaşılır.

Uzun dalga boyu (8–12 μm) çalışma aralığında yayılan radyasyon tüm yayılan radyasyonun 3'te biridir. Bu yüzden bu bölge genellikle tercih edilir. Ancak nemli havalarda, uzun mesafelerde veya çok sıcak cisimlerin görüntülenmesinde orta dalga boyu (3–5 μm) çalışma aralığında daha iyi sonuçlar alınabilir.

Cisimlerden yayılan radyasyonun atmosferde azalması geçirgenlik ile mesafe arasında üstel bir bağlantıya dayanan Beer kanunu kullanılarak hesaplanabilir [9]. Buradaki üstel parametre tükenme katsayısı (extinction coefficient) olarak tanımlanır.

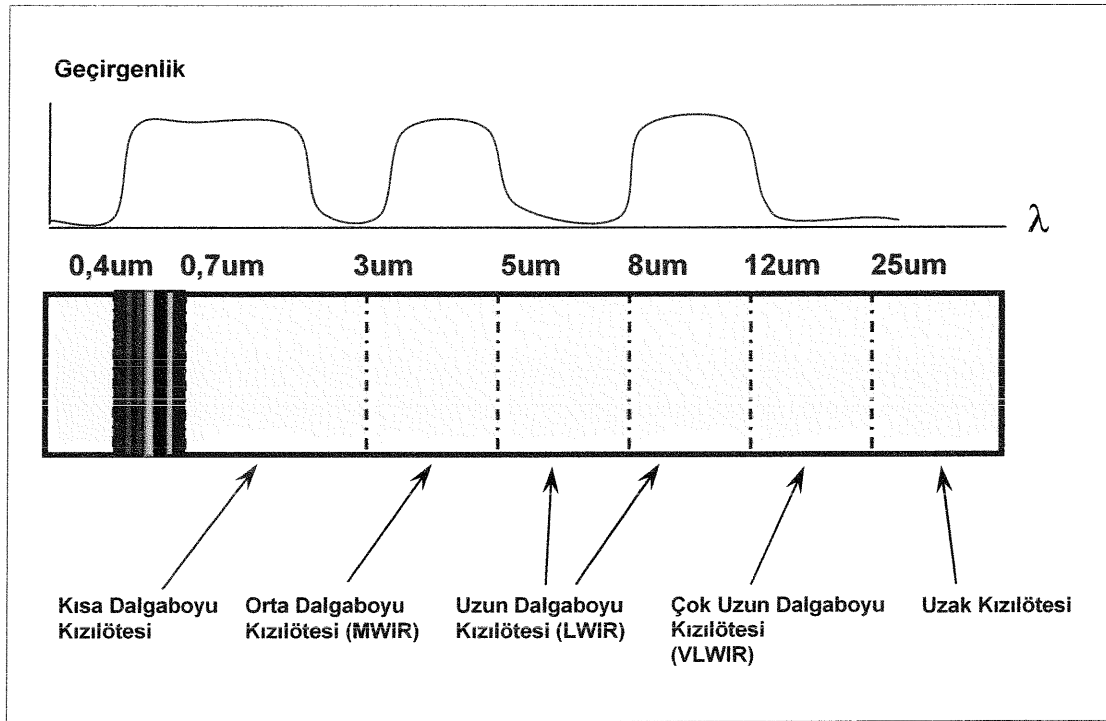
Atmosferik geçirgenliğinden dolayı her 1 km için geçirgenlik 0,40 ile 0,90 arasında değişir. 1 km'den daha uzun mesafelerdeki geçirgenlik bu konu ile geliştirilmiş bilgisayar programları olan LOWTRAN veya MODTRAN ile hesaplanabilir [1].

Daha uzun dalga boyu aralığı bulunan kızılötesi bölgesinde çalışan, kızılötesi dedektörler ile kötü hava koşullarında ve duman, sis, pus gibi dış sebepler sebebiyle azalan görünürlükte bile görünür bölgelere oranla daha iyi görüntüler almak mümkündür.

Atmosferi geçen kızılötesi sinyaller dedektörler vasıtasıyla algılanılarak görüntüye dönüştürülürler. Sonuç olarak termal görüntüleme dedektörleri:

- Dış aydınlatmaya ihtiyaç duymazlar, tamamıyla karanlık alanlarda bile çalışabilirler;
- İnsan gözünün algılayabileceği görüntüden daha fazla bilgi verebilirler;
- DC seviyesi sinyal oluşturabilmek maksadıyla dedektör dizinleri kullanmak zorundadırlar.

3.1.1. Optik spektrum



Şekil 3.1. Optik spektrum

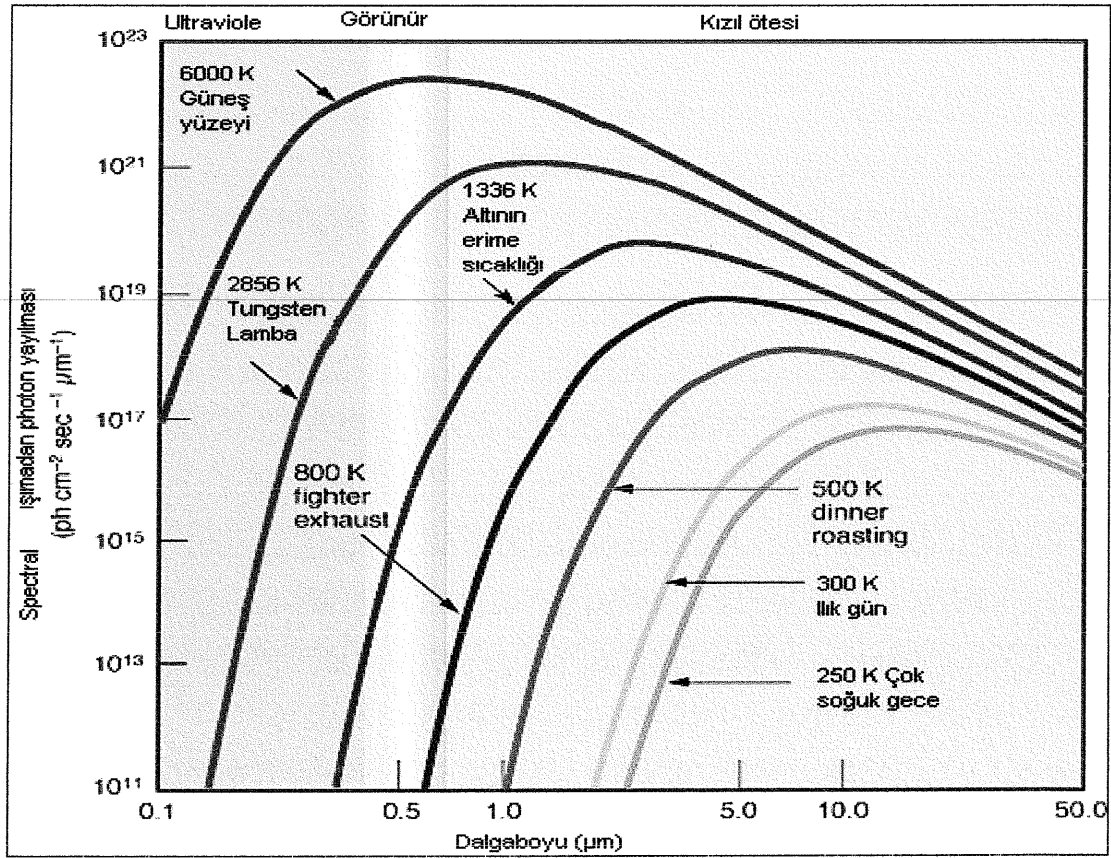
- *Görünür Bölge (Visible region-VIS)*: 0,4 – 0,7 μ m dalga boyuna sahip olup, görünür ışığın renk tayflarını içerir.
- *Kısa Dalga Boyu Kızılötesi (Short Wavelength Infrared-SWIR)*: 0,7–3 μ m dalga boyuna sahiptir.

- *Orta Dalga Boyu Kızılötesi (MidWavelength Infrared-MWIR):* 3–5 μm dalga boyuna sahiptir.
- *Uzun Dalga Boyu Kızılötesi (Long Wavelength Infrared-LWIR):* Ortalama 8–12 μm dalga boyuna sahiptir. LWIR bant karadaki nesnelere için mükemmel görünürlük sağlar.
- *Çok Uzun Dalga Boyu Kızılötesi (Very Long Wavelength Infrared-VLWIR):* 12–25 μm dalga boyuna sahiptir.
- *Uzak Kızılötesi (Far Infrared):* Spektrumun bu bölgesi 25 μm 'den daha büyük dalga boyuna sahiptir.

3.1.2. Kızılötesi Işıma

Latince ön ek olarak kullanılan "infra" sözcüğü "ötesinde" veya "altında" anlamındadır. Bundan dolayı "infrared" kırmızının sonundaki görünür renkli spektrumun ötesinde (dalga boyu olarak) veya altındaki bölgeyi (enerji olarak) temsil eder. Kızılötesi bölge, elektromanyetik spektrumdaki görünür ve mikrodalga bölgelerin arasındadır. Isınan nesnelere kızılötesi bölgede ışınal enerji açığa çıkarmaktadır. Bütün nesnelere, hatta oda sıcaklığında ve donmuş nesnelere de kızılötesi bölgede az da olsa ışınal enerji yayarlar. Yani sıcaklığı mutlak sıfırın (0 Kelvin, -273 °C) üzerindeki tüm cisimler kızılötesi enerji yayar. Bu durum Şekil 3.2.'de ayrıntılı olarak görülmektedir.

Oldukça yüksek sıcaklıktaki bir nesnenin, ışınal enerji spektrumu da yüksektir. Oda sıcaklığındaki bir cismin en fazla kızılötesi enerji yaydığı dalga boyu (tepe dalga boyu) yaklaşık 10 μm 'dir. Şekil 3.2.'de görüldüğü gibi cismin sıcaklığı arttıkça, yaydığı enerji artmakta, tepe dalga boyu azalmaktadır. Güneşin sahip olduğu sıcaklık 5900 K'e eşit ve tepe dalga boyu yaklaşık 0.53 μm (yeşil ışık)'dir. Şekilde, güneş, morötesinden (ultravioleto-UV) uzak kızılötesi bölgenin ötesine kadar bol miktarda enerji açığa çıkarmaktadır.



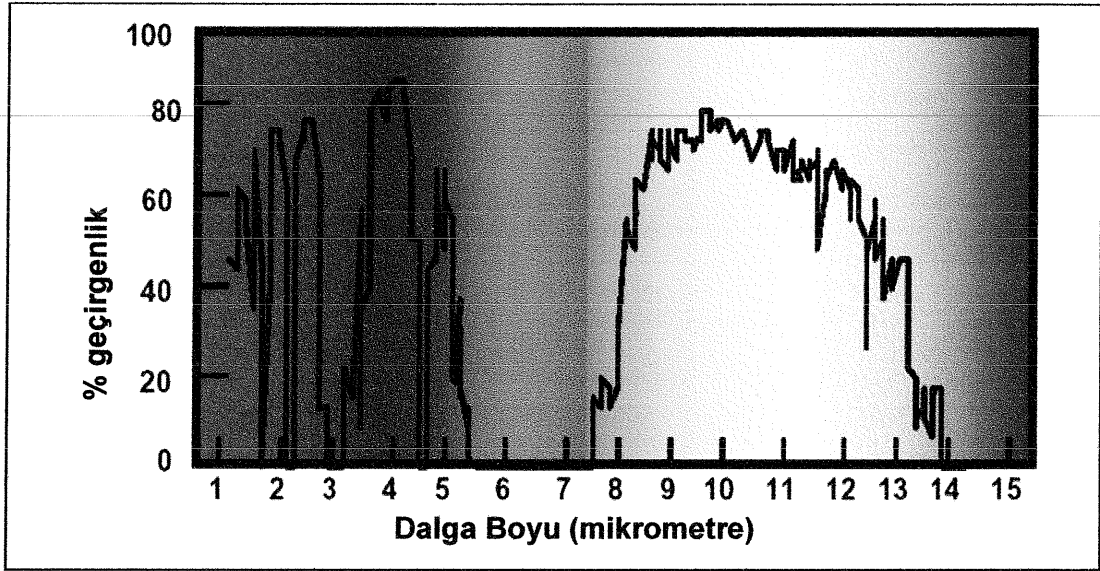
Şekil 3.2. Kızılötesi ışıma

3.1.3. Atmosferik geçirgenlik

Spektrumun kızılötesi bölgesinde atmosferik geçirgenlik ve yayılım oldukça önemlidir. Görünür bölgede atmosfer özellikle soğurmasızdır. Dolayısı ile geçirgenliğin olmaması tamamen saçılmalardan kaynaklanmaktadır. Kızılötesi bölgenin bir bölümünde hemen hemen yüksek oranda soğurma varken diğer kısımda soğurma oldukça düşüktür. Dalga boyunun çok büyük olması ve Rayleigh saçılmasının dalga boyunun dördüncü kuvveti ile ters orantılı olmasına bağlı olarak saçılma minimum düzeydedir.

Atmosferik yayılım, atmosferik geçirgenliğin bir parçasıdır. Geçirgenlik ve soğurma atmosferin içindeki parçacıkların (Su buharı, CO₂ vb.) bir

fonksiyonudur ve soğurma spektrumun kızılötesi bölgesinde oldukça önemlidir. Şekil 3.3.'te atmosferin farklı dalga boyuna göre soğurma-geçirgenlik ilişkileri görülmektedir. Bu solar spektrum olarak adlandırılır.

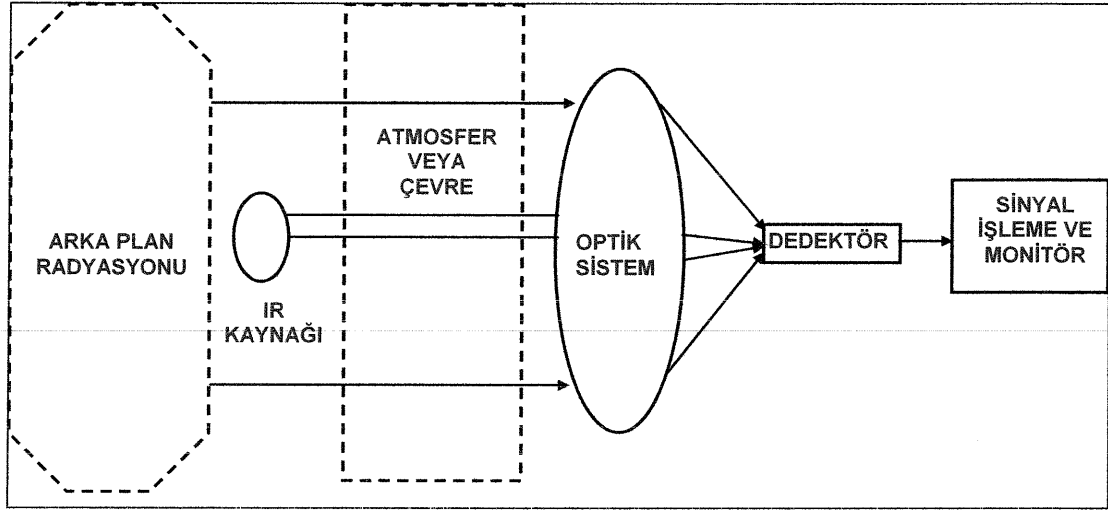


Şekil 3.3. Atmosferik geçirgenlik

Güneş siyah cisim (black body) ışıması yapan bir nesne olarak kabul edildiğinden yukarıdaki şekil atmosferin hangi aralıkta ve hangi oranda geçirgen olduğunu göstermektedir. Kızılötesi soğurma atmosferdeki moleküllerin rotasyonel ve vibrasyonel hareketlerinden kaynaklanmaktadır. Bu bölgede atomik nitrojen ve oksijen aktif değildir. Bu nedenle herhangi bir soğurma yapmazlar.

3.2. Basitleştirilmiş Radyometrik Performans Eşitliği

Kızılötesi görüntüleme sistemi tasarımı yapılırken, sistemin performansını etkileyen altı temel faktör vardır. Sistem tasarımı yapılırken Şekil 3.4.'te gösterilen bu altı faktörün de termal görüntüye etkisi incelenmelidir. Kaynak ve arka plan incelenirken, görüntülenmek istenilen kaynak ile arka plan



Şekil 3.4. Genelleştirilmiş kızılötesi sistem

arasındaki sıcaklık farkı hesaplanmalıdır. Atmosferik ortamın etkisi incelenirken elektromanyetik spektrum bandı içerisinde bulunan kızılötesi pencereler ile ortamdaki gazların ve mesafenin atmosferik geçirgenliğe olan etkileri incelenmelidir. Optik kısımların tasarımı yapılırken cam materyallerin kızılötesi radyasyon geçirgenliği incelenmelidir. Dedektör tasarımında ise kullanılan yarı iletken malzemenin cinsi ve yapım teknikleri önemlidir. Bu dört faktörü kullanarak sistem performansını oluşturan sinyal-gürültü oranı basitleştirilerek Eş. 3.1'deki gibi formülize edilebilir [10].

Sinyal-gürültü oranı = [kaynak gücü – arka plan gücü] x [atmosferik geçirgenlik] x [optik geçirgenlik] x [dedektörün verimliliği]

$$S / N = [W_T \epsilon_T - W_B \epsilon_B] \tau_A \left[\frac{\tau_{od}'}{4(f/\#)^2} \right] \left[\frac{D^*}{\sqrt{\Delta f}} \right] \quad (3.1)$$

Eş. 3.1'de parantezler içindeki sistem performansına etki eden faktörler aşağıda incelenecektir.

3.2.1. Termal radyasyon kanunları

$$[W_{T\mathcal{E}T} - W_{B\mathcal{E}B}] \quad (3.2)$$

İlk olarak Eş. 3.1'in ilk parantezi olan ve Eş. 3.2'de gösterilen kısmı incelenecektir. Bu eşitlikte W ilgilenilen dalga boyu santimetredeki güç cinsinden radyal yayılımı ifade etmektedir. \mathcal{E} boyutsuz olarak yayılımı ifade etmektedir. T İngilizce hedefi (target) ve B ise İngilizce arka planı (back ground) simgelemektedir. Arka plan radyasyonu hedefi saran çevrenin yaydığı radyasyondur. Gerçek veya net radyasyon hedef ve arka plan radyasyonu arasında farktan oluşmaktadır. Bir görüntü elde edebilmek için hedef ile arka plan arasında negatif veya pozitif mutlaka bir radyasyon farkı olması gerekmektedir. İlerideki bölümlerde termal radyasyon kanunları detaylı olarak açıklanacaktır.

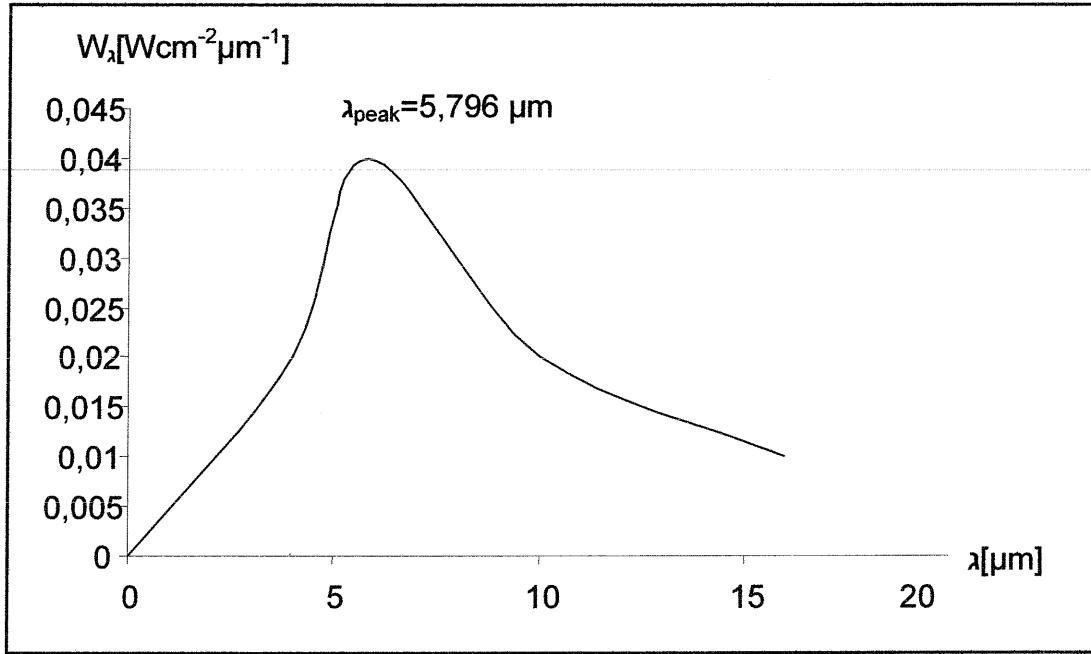
Siyah cisim radyasyonu ve Planck Kanunu

Siyah cisim, üzerinde bulunan tüm radyasyonu emen mükemmel bir radyatör olarak tanımlanabilir. Max Planck (1858–1947), çalışmaları sırasında siyah cisim tarafından yayılan radyasyonu sıcaklık ve dalga boyu olarak ifade eden bir bağıntı bulmuştur. 19 Ekim 1900 yılında, tespit ettiği bağıntıyı deneysel olarak ispatlamıştır. Yalnızca 2 ay sonra 14 Aralık 1900 tarihinde bu bağıntıyı Eş. 3.3'de gösterildiği şekilde teorik olarak ortaya koymuştur [11].

$$W_{\lambda} = \frac{C_1}{\lambda^5 [e^{C_2/\lambda T} - 1]} \quad (3.3)$$

Eş. 3.3'de W_{λ} çalışılan dalga boyu aralığındaki radyal yayılımı ($W \text{ cm}^{-2} \mu\text{m}^{-1}$), λ dalga boyunu (μm), T siyah cisim sıcaklığını (K), $C_1=37,418$ ve $C_2=14,388$ (alanın santimetre kare cinsinden olması durumunda), e doğal logaritma tabanı olan 2,718'yu göstermektedir.

Şekil 3.5.'te 500 K sıcaklıktaki siyah cisim için Planck grafiği verilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi radyal yayılım dalga boyuna bağlıdır.



Şekil 3.5. T=500 K sıcaklıktaki siyah cisim için Planck grafiği

Stefan-Boltzmann Kanunu

Josef Stefan (1835–1893) ve Kudwig Boltzmann (1844–1906) deneysel olarak siyah cisimden yayılan toplam radyasyonu Eş. 3.4 'te gösterildiği gibi bulmuşlardır [10].

$$W_{total} = \sigma T^4 \quad (3.4)$$

Eş. 3.4'te $\sigma = 5.66961 \times 10^{-12}$ ($\text{W cm}^{-2} \text{K}^{-4}$) ve T ise kaynağın sıcaklığını K cinsinden göstermektedir.

Wien Yer Değişirme Kanunu

Siyah cismin yayılım yaptığı tepe dalga boyu ile sıcaklık arasında basit bir bağlantı vardır. 1911 yılında Nobel ödülü alan Wilhelm Carl Otto Fritz Wien (1864–1928) tarafından bu bağıntı Eş. 3.5'te gösterildiği gibi bulunmuştur.

$$\lambda_p T = 2897,8(\mu m K) \quad (3.5)$$

Bu eşitlikte tepe dalga boyunun kaynak sıcaklığı ile çarpımının sabit olduğu gösterilmektedir. Bu bağıntı, sıcaklık arttıkça radyasyon yayılımının daha kısa dalga boylarında meydana geldiğini göstermektedir [10].

Kirchhoff Kanunu ve yayılma

Gustav Robert Kirchhoff (1824–1887) 1860 yılında “termal denge noktasında, bir cisim tarafından yayılan radyasyon, emilen güce eşit olmalıdır” diye belirtmiştir. Bu, üzerinde bulunan radyasyonu yüzde yüz emen bir cismin, buna karşılık olarak yüzde yüz yayılım yapması demektir. Bu ifade daha önce verilen siyah cisim tanımına uymaktadır.

Ancak birçok radyasyon kaynağı siyah cisim değildir. Üzerlerindeki enerjinin bir kısmı kırılabilir ve yansiyabilir. Böyle bir kaynağın üzerinde bulunan radyal yayılım olan W' 'nin aynı sıcaklıktaki siyah cismin yayılımı olan W 'na oranı yayılma (emissivity- \mathcal{E}) olarak adlandırılır. Bu oran Eş. 3.6'da gösterilmiştir. Siyah cismin yayılması 1'dir [10].

$$\mathcal{E} = W'/W \quad (3.6)$$

3.2.2. Atmosfer yoluyla iletim

Bu kısımda Eş. 3.1'in ikinci parantezi olan ve Eş. 3.7'de gösterilen kısmı incelenecektir. Bu eşitlikte $[\tau_A]$ atmosfer boyunca iletilen radyal enerjiyi temsil etmektedir.

$$[\tau_A] \quad (3.7)$$

Atmosferin geçirgenliğini, sıcaklıkta meydana gelen değişimler, gazların basınçları, atmosferde bulunan partiküllerin kimyasal bileşikleri, şekilleri ve büyüklükleri, eğimli optik yol gibi birçok faktör etkilemektedir.

Atmosferik geçirgenliğe etki eden asıl faktörler bu tezin 4'ncü bölümünde detaylı olarak incelenecektir. Müteakiben değişik atmosferik ortamlarda kızıl ötesi termal görüntü alınması ve geçirgenliğin değişik atmosferik ortamlarda ölçülerek bir matematiksel model oluşturulması hedeflenmektedir. Eş. 3.7'de ifade edilen radyal enerji, atmosferde bulunan iki ana bileşen olan ve sıcaklık ve rakım ile değişen su ve karbon dioksit cinsinden Eş. 3.8'de gösterildiği gibi ifade edilebilir.

$$\tau_{atmos} = \tau_{CO_2} \times \tau_{H_2O} \quad (3.8)$$

Burada su buharı, sıcaklık ve nem ile değişen su buharı yoğunluğunu temsil etmektedir. Bu sebeple bu tez çalışmasında yapılacak olan çalışmalarda 3–5 μm kısa dalga boyu kızıl ötesi bölgede ve 8–12 μm uzun dalga boyu kızıl ötesi bölgede atmosferde bulunan su buharı ve karbon dioksitin termal görüşe etkilerinin incelenmesi hedeflenmektedir.

3.2.3. Optik geçirgenlik

Bu kısımda Eş. 3.1'in üçüncü parantezi olan ve Eş. 3.9'da gösterilen kısmı incelenecektir.

$$\left[\frac{\tau_0 d'}{4 \left(\frac{f}{\#} \right)^2} \right] \quad (3.9)$$

Bu eşitlikte τ_0 , sadece lens ve ayna değil aynı zamanda pencere ve filtre de içeren optik elementler için emilim ve Fresnel kayıplarını ifade etmektedir [10].

3.2.4. Dedektör çeşitleri

Bu kısımda Eş. 3.1'in dördüncü parantezi olan ve Eş. 3.10'da gösterilen kısmı incelenecektir. Öncelikle dedektör çeşitleri hakkında bilgi sunulacak daha sonra da dedektör dizinleri ve odak düzlem matrisi ile ilgili bilgi verilecektir.

$$\frac{D^*}{\sqrt{\Delta f}} \quad (3.10)$$

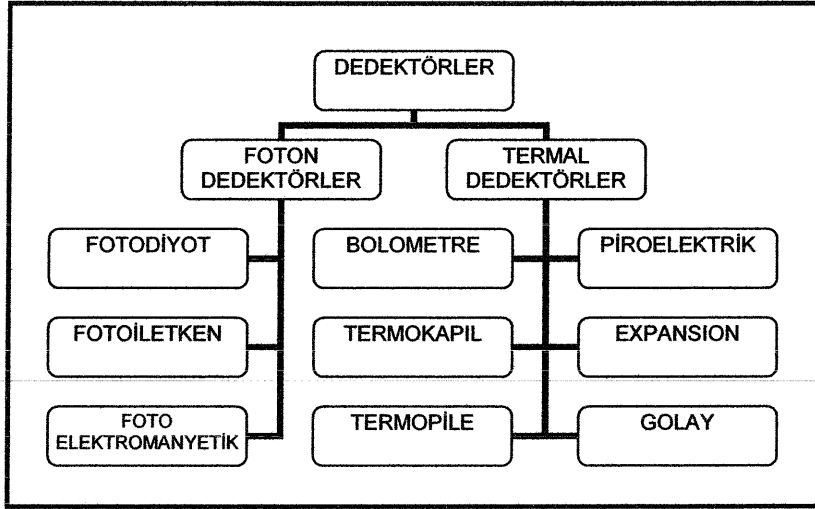
Dedektörler iki farklı kategoride değerlendirilebilir. Bunlar çalışma mekanizmaları ve alan karakteristikleri olmak üzere termal ve kuantum dedektörlerdir. Termal dedektörler kendi sıcaklıklarına ya da sıcaklık değişikliklerine cevap verirler. Yani optiksel giriş ışın demeti soğurular, ısı çok kısa zamanda elde edilir ve dedektör malzemesinde sıcaklığın artmasına sebep olur. Sıcaklıkla değişen bazı fiziksel özellikler sayesinde algılama yapılır. Eğer etki dirençte bir değişimse (sıcaklıkla direnç değişimi)

dedektörler bolometrik olarak sınıflandırılır. Eğer değişim farklı potansiyellerin kontağı şeklinde ise bu tür dedektörler termokapıl (thermocouple) ya da termopile olarak adlandırılır. Eğer bu değişim (etki) iç elektrik alan (polarizasyon)'da gerçekleşiyorsa buna da piroelektrik dedektörler denir. Daha az popüler olanları ise gaz-genleşme ya da fenomatik dedektörler ve bunların lineer genişletilmiş parçalarıdır.

Eğer dedektör mekanizması üzerine doğrudan düşen fotonlarla cevap verebilme özelliğine sahip ise, örneğin bir elektron iletken banda ortalama iki fotonla uyarılırsa bu tür dedektörlere fotodedektör ya da foton dedektörler denir. Eğer dedektör direnci (ya da iletkenlik) gözlemlenirse bu bir fotoiletkenidir. Eğer voltaj gözlenir, besleme uygulanmazsa fotovoltatik dedektör, eğer ters besleme uygulanırsa fotodiyot olarak adlandırılır.

İdeal termal (ısısal) dedektörler dalga boyuna göre değişmeyen cevaplama kabiliyetine sahiptir. Birçok ısısal dedektörler yaklaşık olarak bu özelliği sağlarlar. İdeal foton dedektörler, kendi spektral bandındaki bütün fotonlara duyarlıdır. Enerji bakımından, bununla birlikte, foton dedektörlerin cevaplamları dalga boyu ile doğrusal olarak kesim (cut-off) dalga boyuna kadar artmaktadır. Cevap verebilme, bütün dalga boyları için foton başına elektron bazında eşittir.

Termal dedektörlerin algılayabilme özellikleri (detektivite) yaklaşık $10^8 - 10^9$ $\text{cm Hz}^{1/2} \text{ w}^{-1}$ ve 1 msn zaman sabitine sahiptir. Dedektör tipleri Şekil 3.6.'da özetlenmiştir.



Şekil 3.6. Dedektör çeşitleri [7]

3.2.5. Dedektör dizinleri ve odak düzlem matrisi

Dedektör dizinleri

İlk zamanlarda kızılötesi aygıtları için tek boyutlu dedektör dizin kullanımı oldukça yaygın durumda idi. Yarıiletken endüstrisinin ilerlemesinin sonucu ve özellikle yüklü çiftlenmiş aygıtların (CCD) gelişmesi ile şu anda iki boyutlu dedektör dizinleri, taramasız olarak bu işlevleri gerçekleştirmektedir. Taramasız dizinler, kızılötesi görüntüleme yeni bir sayfa açmıştır. Hali hazırda iki tür dizin yapısı bulunmaktadır. Bunlar hibrit ve monolitik olarak adlandırılır.

İndiyum Antimon (InSb) malzemesi orta dalga boylu kızılötesi (MWIR) için önemli ve nispeten bilinen bir teknolojidir. Civa Kadmiyum Tellür (MCT: Mercury Cadmium Telluride), hem orta dalga boylu kızılötesi hem de uzun dalga boylu kızılötesi bölgeleri için üretilir. Uzun dalga boyuna uygun malzeme üretimi orta dalga boyuna göre daha zordur. Katkılı (doped) Silisyum, uzun dalga boylu kızılötesi (LWIR) dedektörler için uygun olmakla birlikte, oldukça düşük sıcaklığa kadar soğutulma (20 K) gereksinimi vardır.

Platin Silisyum (PtSi) oldukça düşük kuantum verimliliğine sahip olmasına rağmen, çok düzgün (very uniform) olmasından ötürü birçok uygulamalar için caziptir. Platinium Silicide'ın düzgünlüğü ve malzeme parametrelerinden dolayı dizindeki piksel sayısı fazladır. Bolometrik ve piro elektrik dedektör dizinleri soğutma gerektirmez, bu sebeple aşırı hassasiyet gerektirmeyen uygulamalar için ilgi çekicidir. İki tür bolometre mevcuttur. Bunlar piro elektrik (veya ferroelektrik) dizinli ve termistor bolometredir. Bu dedektörlerin dizin yapısı ne monolitik ne de tümsek bantlı (bump bonds) yapıdadır. Bunların algılama (detectivity) değeri yaklaşık olarak 10^9 civarında olup, algılama sıcaklık farkı 0,1 K civarında termal görüntüleme sistemleri yapmak mümkündür.

Dedektör dizinleri optik bir görüntünün elektriksel sinyale dönüşmesini sağlar. Dedektör dizinlerinde görüntü, taranarak veya dedektör dizininin üzerine odaklanmasıyla elde edilir. Bu yapıyı kullanan dedektörlerde görüntünün taranmasıyla elde edilen girdilere karşılık dedektör çıkışlarının senkronizasyonlu ve sırayla okunması sağlanmalıdır. Her dizinde binlerce dedektör olduğu düşünülürse bunların birbiriyle koordineli ve bağlantılı çalışması, daha düzgün ve net sonuçlar alınmasını sağlar. Bu problemin çözümü için CCD (yük çiftlenmiş aygıt) kullanılır. CCD'in en etkin özelliği metal oksit yarı iletken (MOS) yapısında olmasıdır. Bu yapı p tipi taban üzerine SiO_2 (silisyum dioksit) büyütülmesi ve metal elektrotun buharlaştırmasından sonra oksit tabakanın üzerine çökertilmesi ile oluşturulur.

Odak düzlem matrisi

İki tür çoklu element dedektör tipi bulunmaktadır. Bunlardan biri tarama sistemi için diğeri ise taramasız (staring) sistemler için kullanılır. En basit lineer taramalı Odak Düzlem Matrisi (Focal Plane Array-FPA) satırlık dedektörlerden oluşur. Görüntü mekanik tarayıcılar kullanılarak ekranın

taranmasıyla oluşur. Standart video resim tarama oranlarında (frame rates), her bir pikselde kısa uyum zamanı (integration time) uygulanır ve bütün yükler yerleştirilir. Bir taramasız dizinde iki boyutlu (2-D) dedektör dizinlerinin taranması elektronik olarak yapılmaktadır. Bu çeşit dizinler gelişmiş hassasiyet ve hafif kameradan dolayı (Kamerada mekanik tarayıcı kullanılmadığından) kazanç sağlarlar.

Odak düzlem çoklayıcı (multiplexing) fonksiyonu içermeyen taramalı sistemler, birinci nesil sistemlerdir. Bu tür dedektörlerin tipik örneği doğrusal fotoiletken dizinlerdir (PbS, PbSe, HgCdTe) ve bunların çoklu element dizinindeki her bir element için elektriksel kontakların dışa doğru soğutmalı odak düzlem haline getirilmesi başarılmıştır. Elektriksel kontaklar her bir dedektör elementi için bir elektronik kanalı çevreleyen sıcaklıktadırlar. ABD ortak parçası (US common module) olarak adlandırılan HgCdTe malzemesinden yapılan bu dizinler uygulama alanına bağlı olarak 60, 120 veya 180 fotoiletken elemandan oluşturulmuşlardır.

İkinci nesil sistemler (tam-çerçevesiz (full-framing) sistemler), hali hazırda geliştirilmeye çalışılmaktadır. İkinci nesil dedektör elemanları iki boyutlu yapıdadır ve eleman (piksel) sayıları çok fazladır.

Taramasız dizinler, dizinlerle bütünleşmiş durumdaki elektronik devrelerle elektronik olarak taranır. Bahse konu elektronik devreler "Readout Integrated Circuit-ROIC" olarak adlandırılır. ROIC'ler; piksel devre dışı bırakma (pixel deselecting), her bir pikselde anti-parlama (antiblooming on each pixel), alt çerçeve resimlenmesi (subframe imaging), çıkış ön yükselteçleri (output preamplifiers) ve diğer bazı fonksiyonları içermektedir [7].

4. IŞINIMIN ATMOSFERDE YAYILIMI VE ATMOSFERİK GEÇİRGENLİK PENCERELERİ

4.1. Giriş

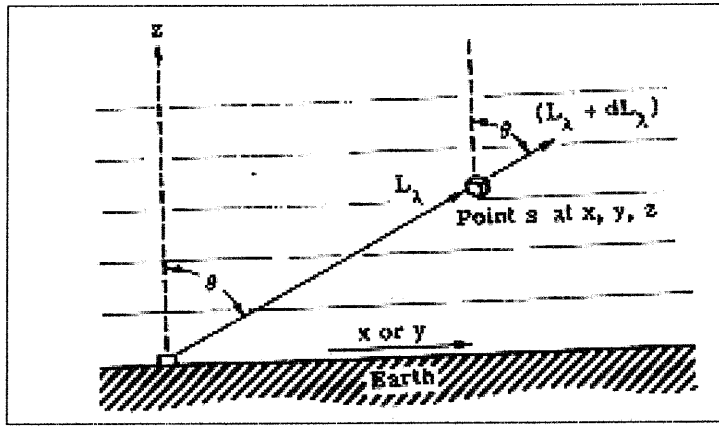
Elektro-optik sistemlerin performansını etkileyen faktörlerden, kaynak, dedektör, optik sistemler ve sinyal işleme konularında yapılan birçok çalışma vardır. Bu çalışmalar sonucunda, söz konusu sistemlerde çok gelişmeler kat edilmiş ve bu sistemlerdeki kayıplar oldukça azaltılmıştır. Dolayısıyla, termal kamera performansını etkileyen en önemli faktör olarak atmosferde meydana gelen kayıplar ön plana çıkmaktadır. Atmosferik geçirgenlik sebebiyle meydana gelen kaybın sebebi, atmosferde bulunan gazların yaptığı çeşitli mekanizmalardır. Kayba sebep olan bu mekanizmalar, emilim (absorption), kırılım (refraction), saçılım (scattering) mekanizmalarıdır. Atmosferde bulunan gazların yaptığı bu mekanizmalar sonucunda meydana gelen kayıplar sebebiyle, kızılötesi bölgenin bazı bölümlerinde atmosferik geçirgenlik pencereleri oluşmuştur. Geçirgenliğin en fazla olduğu kızılötesi pencereler, 3–5 μm ile 8–12 μm dalga boyu geçirgenlik pencereleridir. Termal gece görüş cihazları bu atmosferik geçirgenlik pencerelerinde çalışmak üzere tasarlanmaktadır. Bu kısımda, öncelikle atmosferik gazların yaptığı bu mekanizmalar kısaca anlatılacaktır. Daha sonra deneysel çalışmalarda kullanılacak termal kameranın çalışma aralığı olan 8–12 μm dalga boyunda, kayba en çok sebep olan su buharı ve karbon dioksitin atmosferik geçirgenliğine etkisi incelenecektir. En son olarak ta çeşitli sıcaklık değerlerinde bağıl nemin değişimi ile atmosferik geçirgenliğin nasıl değiştiği irdelenecektir.

4.2. Atmosferde Işınımın Transferi

Bir ortamda bir taraftan öbür tarafa hareket eden ışınımın azalması; başlangıç ışınımı, hacim olarak azalan ortamın yoğunluğu, yol boyunca termal olarak yayılan ışınım ve katledilen mesafenin artması ile doğru orantılı

olarak değişir [12]. Bu orantı formülize edilerek Eş. 4.1 ve Şekil 4.1.'de gösterilmiştir.

$$dL_{\lambda}(r) = - \left[\sum_i C_{ei}(\lambda, r) \rho_i(r) \right] L_{\lambda}(r) dr + J_{\lambda}(r) dr \quad (4.1)$$



Şekil 4.1. Dikey olarak tabakalara ayrılmış olan ortamda ışınımın azalması

Bu eşitlikte;

$L_{\lambda}(r)$ = (x,y,z) koordinatlarındaki bir r noktasının spektral ışınımı

$J_{\lambda}(r)$ = yol boyunca yayılım ve çarpışmaya karşılık gelen kaynak terimi

ρ_i = i'nci gaz veya parçacığın yoğunluğu (cm^{-3})

$C_{ei}(\lambda, s)$ = i'nci gaz veya parçacığın spektral azalma kesiti (cm^2)

$C_{ei}(\lambda, s) = C_{ai}(\lambda, s) + C_{si}(\lambda, s)$

$C_{ai}(\lambda, s)$ = spektral emilim kesiti

$C_{si}(\lambda, s)$ = spektral çarpışma kesitini göstermektedir.

4.3. Yeryüzünün Atmosferi

Atmosfer; yeryüzü zararlı ışınımlara ve meteorlara karşı bir kalkan görevi yapar. Yüzeydeki havayı, atmosferin dinamikleri oluşturmaktadır.

Yeryüzündeki yaşamı dünyanın biosferinin bir parçası olarak sağlamaktadır. Bu ortamdaki optik yayılımın çok önemli karakteristikleri ve sonuçları bulunmaktadır. Bunlar meteorolojik uzaktan algılama, kızılötesi ve görünür astronomi, genelde uzaktan algılama ve elektro-optik sistemlerin performansını kapsamaktadır.

4.3.1. Atmosferik yapı

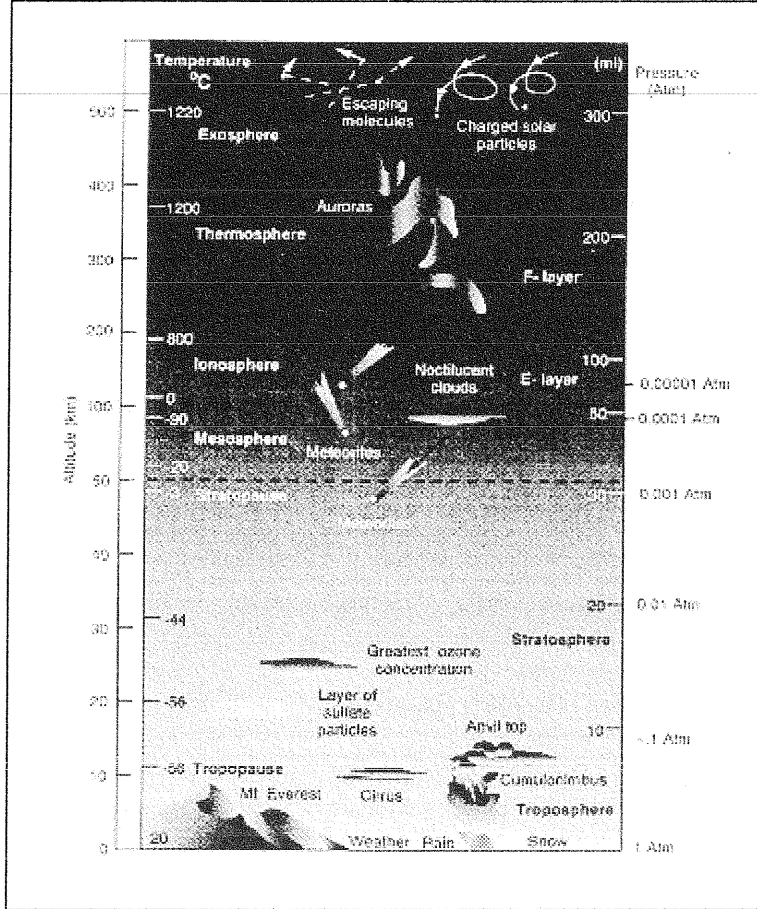
Atmosfer; çeşitli sıcaklık ve basınçlarda yatay ve dikey fonksiyonlara bağlı olarak değişen çeşitli gazlardan ve parçacıklardan oluşmuştur. Atmosferin ana yapısını Şekil 4.2.'de gösterilen altı yatay katmandan oluşmaktadır. Yeryüzünden yaklaşık 11 km kadar yükselen tabaka troposfer olarak bilinmektedir. Bu tabakadaki sıcaklık yüksekliğin $6,5 \text{ K km}^{-1}$ 'lik bir oranla artması ile genellikle düşmektedir. Atmosferik kayba neden olan bir madde bu tabakada yer almaktadır (Ör : H_2O , CO_2 , bulutlar, sis, uçucu gazlar vb.) Düşük yükseklikte kayba sebep olan en önemli madde su buharıdır. Su buharı bu bölgede en yüksek basınca dolayısıyla en yüksek moleküler çarpışmaya sahiptir [13].

4.3.2. Atmosferdeki gaz bileşimleri

100 km rakıma kadar olan atmosfer içerisinde bulunan karışık gazların sabit oranları Çizelge 4.1.'de verilmiştir [14].

Çizelgede yer alan gazların oranları, zamanla bir değişim göstermez. Görüldüğü gibi atmosferde en baskın iki gaz azot ve oksijendir. Mevsimsel bazı değişimler gösterebilir. Geçirgenliğe etkisi olan ve sıcaklık ile değişen bazı önemli moleküllerin değişen oranları Çizelge 4.2.'de gösterilmiştir. Çizelgeden de görüldüğü gibi geçirgenliği en çok etkileyen gazlar H_2O , CO_2 ve O_3 'dur.

Su buharı genel olarak, troposfer katmanında mevcuttur ve günden güne, mevsimden mevsime, rakım ve değişik coğrafi şartlara bağlı olarak değişik oranlarda bulunur. Karbon dioksit ise mevsimsel olarak maksimum olarak



Şekil 4.2. Yükseklik ile atmosferin yapısı

ilkbaharda ve minimum olarak ise yaz sonları ile sonbahar mevsimlerinde 80 km yüksekliğe kadar mevcuttur. Bu önemli gazların değişken yapısı kızılötesi bölgede atmosferik geçirgenliğin tahmin edilmesini güçleştirmektedir. Havada bulunan su buharı konsantrasyonu, parçacıkların çarpışma mekanizmalarını da etkilemektedir. Bu kapsamda, kızılötesi bölgede emilim ve çarpışmanın en büyük sebebinin atmosferde bulunan su buharı olduğu söylenebilir [10].

4.4. Atmosferik Emilim, Kırılım ve Saçılım

Bu bölümde, elektromanyetik enerjinin bir fotonunun atmosferik bir parçacığa yaklaştığında meydana getirdiği emilim, yön değiştirme (kırılım ve saçılım) ve etkilenmeden geçme mekanizmalarının atmosferik geçirgenliğe olan etkileri incelenecektir.

Çizelge 4.1. Kuru atmosferde bulunan standart gaz miktarları

Bileşen	Hacim Oranı (%)	Milyon Başına Düşen Parçacık Sayısı
Azot, N_2	78,084 ± 0,004	-
Oksijen, O_2	20,946 ± 0,002	-
Argon, Ar	0,934 ± 0,001	-
Neon, Ne	0,001818	18,18 ± 0,04
Helyum, He	5,24 x 10 ⁻⁴	5,24 ± 0,004
Kripton, Kr	1,14 x 10 ⁻⁴	1,14 ± 0,01
Ksenon, Xe	-	0,087 ± 0,001
Hidrojen, H_2	-	0,5
Metan, CH_4	-	1,6
Nitrat Oksit, N_2O^*	-	0,5 ± 0,1

* Kirli havada değişik miktarlarda bulunur.

İlk olarak atmosferik moleküller tarafından meydana gelen emilim ve kırılım mekanizmaları incelenecektir. Atmosferik geçirgen bölgeler, genel olarak moleküler emilimlerin sonucunda belirlenir (özellikle su buharı ve karbon dioksit) [15].

4.4.1. Atmosferik gazlar tarafından yapılan emilim

Atmosferde bulunan bazı moleküller tarafından meydana gelen emilim mekanizmaları, atmosferde bulunan geçirgenlik pencerelerinin tespitinde en

Çizelge 4.2. Atmosferik gazların değişken miktarları

Bileşen	Hacim Oranı (%)	Milyon Başına Düşen Parçacık Sayısı
Ozon, O_3	-	0 – 0,3 (Troposferik *)
	-	1–7 (20–30 km arası)
Su Buharı, H_2O	0 – 2	-
Karbon Dioksit, CO_2	0,035	351 ± 4
Karbon Monoksit, CO^*	-	0,19
Nitrik Asit Buharı, HNO_3	-	(0'dan 10'a kadar) $\times 10^{-3}$
Amonyak, NH_3	-	Az miktarda
Hidrojen Sülfid, H_2S	-	(2'den 20'ye kadar) $\times 10^{-3}$
Sülfür Dioksit, SO_2^*	-	(0'dan 20'ye kadar) $\times 10^{-3}$
Azot Dioksit, NO_2	-	Az miktarda
Nitrik Oksit, NO	-	Az miktarda

* Kirli havada değişik miktarlarda bulunur.

önemli faktördür. Ayrıca bu gazlar tarafından meydana gelen emilim mekanizmaları milimetre ve kızılötesi dalga boylarındaki kayıpların en önemli sebebidir. Bu sebeple kızılötesi görüntüleme sistemlerinin performansı hesaplanırken atmosferik moleküller tarafından meydana gelen emilimin doğru olarak modellenmesi çok önemlidir. Su buharı emilim bantları, karbon dioksit ile birlikte kızılötesi bölgedeki geçirgenliği belirlemektedir. Milimetre ve mikrodalga dalga boylarında ise oksijen ve su buharı geçirgenlik pencerelerini belirler.

Geçirgenlik pencerelerindeki sürekli emilimi göz önüne alındığında su buharı emiliminin en çok 3–5 μm ve 8–12 μm dalga boyu geçirgenlik pencerelerinde etkili olduğu görülmektedir.

Su buharı harici diğer gazlar tarafından yapılan emilimler incelendiğinde; karbon dioksit, metan, ozon, nitrat oksit, oksijen ve karbon monoksit'in su

buharı kadar olmasa da bir miktar emilim yaptığı görülmektedir. Bu gazların en etkili olan karbon dioksit'in geçirgenlik pencerelerinde yaptığı emilimler incelenirse yerel çizgi emilimin 10 μm ve 5 μm bölgelerinde uzak mesafelerde bir miktar etkisi olduğu görülmektedir [13].

4.4.2. Atmosferin kırılım etkileri

Kırılımın atmosferik indeksinin gerçek kısmı basınç, sıcaklık ve frekansın bir fonksiyonudur. Troposferik değişkenlerin yoğunluğu ve yer değiştirmenin bir fonksiyonu olan su buharı kısmi basıncından dolayı birçok ilginç kırılım etkileri bulunmaktadır.

Atmosferde çok miktarda bulduklarından dolayı azot ve oksijen, yeryüzü atmosferinin kırılım etkisinde en önemli katkıyı vermektedir. Bu moleküllerin kızıl ötesi dalga boylarında önemli bir kırılım etkisi yoktur. Bu sebeple kırılımın etkisi yalnızca alçak frekanstan mor ötesine kadar elektronik dalga boylarında önem kazanır.

Kırılımın etkisinin kızılötesi dalga boylarında modellenmesi çok karışıktır. Çünkü bu bölgede su buharının güçlü titreşimsel ve rotasyonel emilimleri dikkate alınmalıdır. Su buharının kırılım etkisi ise radar frekanslarında dikkate alınmalıdır [13].

4.4.3. Atmosferik saçılım

Atmosferik saçılım, atmosferde bulunan toz, su, buz, tuz vb. parçacıkların veri ve modellerinin karakterize edilmesiyle modellenenir.

Atmosferik aerosollerin dikey olarak atmosferde bulunma olasılıklarının modellenmesi, atmosferin dikey olarak birtakım katmanlara bölünerek incelenmesi sonucu yapılabilir. Her katmanda belirli bir fiziksel mekanizma, parçacıkların tipi, yoğunluğu ve boyutunu belirler. Genel olarak kabul edilen

modelde 4 katman bulunur. İlk katman 0–2 km'de bulunan sınır tabakası, 2 ile 6 km arasında bulunan bir tabaka, 6–30 km arasında bulunan katman ve 30 km üzerindeki katmandan oluşur.

Aerosollerin genel olarak buldukları tabakanın kalınlığı yaklaşık 2 km'dir. Bu bölgede, aerosollerin, yeryüzü seviyesinde bulunan koşullardan etkilenmesi beklenir. Dolayısıyla bu bölgedeki aerosoller meteorolojik koşullar, iklim vb. gibi etkilerle yüksek bir değişkenlik gösterirler. Bu katmanda parçacıklar ya kendi başlangıç noktalarından atmosfere doğru hareket ederler ya da gaz-parçacık değişimine uğrarlar veya foto kimyasal bir süreç geçirirler.

Deniz kenarında, parçacıklar çoğunlukla deniz suyu çözeltileri veya sülfatlardan meydana gelirler. Çöl bölgelerinden rüzgârın etkisiyle gelen tozlar, kıtasal aerosollerini oluştururlar. Mevcut modeller kırsal, kentsel, deniz kenarı, çöl bölgeleri ve sisli bölgeler için yapılmıştır.

Atmosferik saçılım her dalga boyunda atmosferde bulunan parçacıkların hareket etmesi sonucunda etkilidir. Kızılötesi bölge için ayrı bir modelleme yapılmasına ihtiyaç yoktur. Hava koşullarının değişimi ile atmosferik saçılım meydana gelmektedir [13].

4.5. Atmosferik Geçirgenlik Çizelgeleri

Atmosferde bulunan gazların yaptığı kırılım, emilim ve saçılım mekanizmaları sonucunda, kızılötesi bölgede iki ana geçirgenlik penceresi bulunduğu daha önce belirtilmişti. Bu pencereler 3–5 μm ve 8–12 μm dalga boyu atmosferik geçirgenlik pencereleridir. Deneysel çalışmaların yapılacağı termal kameranın algılama dalga boyu 7,5–11,6 μm olduğundan, bu kısımda 8–12 μm dalga boyu aralığında, en etken gazlar olan su buharı ve karbon dioksitin atmosferik geçirgenliğe etkisi incelenecektir.

4.5.1. 8–12 µm dalga boyunda su buharı ve karbon dioksitin atmosferik geçirgenliğe etkisinin incelenmesi

Herhangi bir dalga boyundaki atmosferik geçirgenlik, karbon dioksit ve su buharının geçirgenlik değerlerinin çarpımı olarak tanımlanabilir.

$$\tau = (\tau_{H_2O}) \cdot (\tau_{CO_2}) \quad (4.3)$$

Kızıl ötesi dalga boyunda atmosferik geçirgenlik çizelgeleri birçok araştırmacı tarafından deneysel olarak ortaya konulmuştur. Bunların arasında en çok kabul göreni Passman ve Larmore tarafından hazırlanmış olan çizelgelerdir [16].

Passman ve Larmore tarafından hazırlanan, 7,0 µm–13,9 µm dalga boyunda su buharının atmosferik geçirgenliğe etkisi çizelgesi EK-1'de ve 7,0 µm–13,9 µm dalga boyunda karbon dioksitin atmosferik geçirgenliğe etkisi çizelgesi ise EK-2'de sunulmuştur.

Söz konusu çizelgeler incelendiğinde su buharının termal kamera geçirgenliğini, çökelti su kalınlığına bağlı olarak çok fazla etkilediği, karbon dioksitin etkisinin ise 5 km'den sonra görüldüğü anlaşılmaktadır. Termal kameraların, genellikle 4–5 km menzilli olarak çalıştıkları göz önüne alınırsa karbon dioksitin termal kameraların performansına etkisinin olmadığı söylenebilir. Karbon dioksitin geçirgenlik değerini "1" olarak Eş. 4.3'de yerine koyarsak, atmosferik geçirgenliği sadece su buharının atmosferik geçirgenliği olarak alabiliriz.

Söz konusu çizelgeler deniz seviyesinde yatay yol için verilmiştir. Deneysel çalışmalar Ankara'da yapılacağından dolayı, irtifadan doğan farkların da hesaba katılması gereklidir. Daha yüksek irtifalara çıkıldığı zaman düşen basınç sebebiyle emilim çizgileri ve bantları daha daralır. Bununla birlikte

geçirgenliğin artması beklenir. h yüksekliğinde x uzunluğunda bir yolun, deniz seviyesinde eşdeğer uzunluğunu x_0 olarak tanımlarsak;

$$x_0 = x \left(\frac{P}{P_0} \right)^k \quad (4.4)$$

Eş. 4.4'de P/P_0 , h yüksekliğindeki atmosferik basıncın oranı, k katsayısı su buharı için 0,5 ve karbon dioksit için 1,5'dur. $(P/P_0)^k$ düzeltme faktörleri 12,2 km yüksekliğe kadar Çizelge 4.3.'de verilmiştir [16]. Ankara'nın rakımının 850 m olduğu düşünülürse, Çizelge 4.3.'ten rakım düzeltme faktörü 0,950 olarak bulunur. 0,950 geçirgenliğin performansı fazla etkilemeyeceği düşünüldüğünden rakımdan dolayı meydana gelen fark, deneysel çalışmada dikkate alınmayacaktır.

Karbon dioksitin 8–12 μm dalga boyunda 5 km'ye kadar etkisinin fazla olmamasından dolayı, bu tez çalışmasında, sadece 8–12 μm dalga boyu aralığında çalışan termal kamera dedektörlerinin atmosferik geçirgenliğinin su buharı ile değişimi incelenecektir. Deneysel çalışmalarla karşılaştırma yapabilmek maksadıyla EK-1'te sunulan su buharının atmosferik geçirgenliği etkisi çizelgenin 8–12 μm aralığındaki geçirgenlik değerleri incelenecektir.

4.5.2. Çeşitli sıcaklık ve nem değerlerinde su buharının atmosferik geçirgenliğe etkisinin analizi

Passman ve Larmore tarafından hazırlanan 8–12 μm kızıl ötesi dalga boyu aralığında su buharının gece görüş cihazlarının atmosferik geçirgenliğine etkisi incelenmeden önce bazı temel kavramların anlatılmasının faydalı olacağı değerlendirilmektedir.

Çizelge 4.3. Yükseklik ile su buharı ve karbon dioksitin değişimi

Rakım		Rakım Düzeltme Faktörü	
km	kft	Su Buharı	Karbon Dioksit
0,305	1	0,981	0,940
0,610	2	0,961	0,833
0,915	3	0,942	0,840
1,22	4	0,923	0,774
1,52	5	0,904	0,743
1,83	6	0,886	0,699
2,14	7	0,869	0,660
2,44	8	0,852	0,620
2,74	9	0,835	0,580
3,05	10	0,819	0,548
3,81	12,5	0,790	0,494
4,57	15	0,739	0,404
5,34	17,5	0,714	0,364
6,1	20	0,670	0,299
6,86	22,5	0,643	0,266
7,62	25	0,609	0,226
9,15	30	0,552	0,168
10,7	35	0,486	0,115
12,2	40	0,441	0,085

Nem ile ilgili tanımlar

Atmosferik bileşikler arasında, birden fazla fiziksel durumda bulunan tek bileşik sudur. Su, kar ve buz kristallerinde katı olarak, yağmur ve bulutlarda sıvı olarak ve atmosferde buhar olarak bulunmaktadır. Buhar olarak göz ile görünemez ancak kızıl ötesi bölgede çalışan cihazlar tarafından algılanırlar [17].

Higrometri, atmosferdeki su miktarını ölçmekle ilgilenen bir fizik bilimi branşıdır. Atmosferik geçirgenliğin hesaplanmasında su buharının etkisinin anlaşılabilmesi maksadıyla bazı temel kavramların anlaşılması gerekmektedir.

Mutlak nem

Mutlak Nem ($AH(t)$) t ($^{\circ}C$) sıcaklıkta atmosferin birim hacminde bulunan su buharı yoğunluğudur. Doymuş Mutlak Nem ($AH_{sat}(t)$) ise t sıcaklığında atmosferin taşıyabileceği maksimum su buharı miktarıdır. Bu durum doyum olarak adlandırılır. Genellikle bir metreküp hacimde bulunan su buharının gram olarak ağırlığı olarak ifade edilir ($g.m^{-3}$).

Bağıl nem

Bağıl nem ile aynı sıcaklıktaki havanın birim hacminde bulunan su buharı miktarının, doymuş su buharı miktarına oranı olarak tanımlanabilir (Eş. 4.2). Bağıl nemin simgesi RH olarak tanımlanabilir [10].

$$RH = \frac{AH(t)}{AH_{sat}(t)} \quad (4.2)$$

Eğer hem bağıl nem, hem sıcaklık aynı anda biliniyorsa, mutlak nem hesaplanabilir.

Çökelti su

Işınımın emilimi, yol boyunca moleküller tarafından yapılan emilimin bir fonksiyonudur. Bu sebeple, nişan hattı boyunca bulunan su buharının miktarını ifade edebilmek için bir ifadenin tanımlanması gerekmektedir. Bu ifade çökelti su olarak tanımlanabilir. Çökelti su, nişan hattı boyunca, nişan

hattı ile aynı kesit alana sahip bir silindirin yüzeyinde biriken su tabakasının kalınlığı olarak tarif edilebilir. Örneğin, sistemin optik camları ile aynı çapta hayali bir silindir tanımlayalım ve bu silindirin optik camlardan hedefe kadar uzun olduğunu varsayalım. Silindiri sona yerleştirelim ve bütün su buharının, silindir ile aynı çapta bir kabın içine çökeldiğini varsayalım. Kabın içinde biriken su buharının kalınlığı bize çökelti su miktarını verecektir. Bu silindirin alanının bilinmesine gerek yoktur. Çünkü alan artırıldığında, daha fazla su buharı çökecektir. Ancak, daha geniş bir alana çöktüğü için kalınlık aynı kalacaktır.

Çökelti su kalınlığına bağlı olarak 8–12 μm dalga boyu geçirgenliğinin analizi

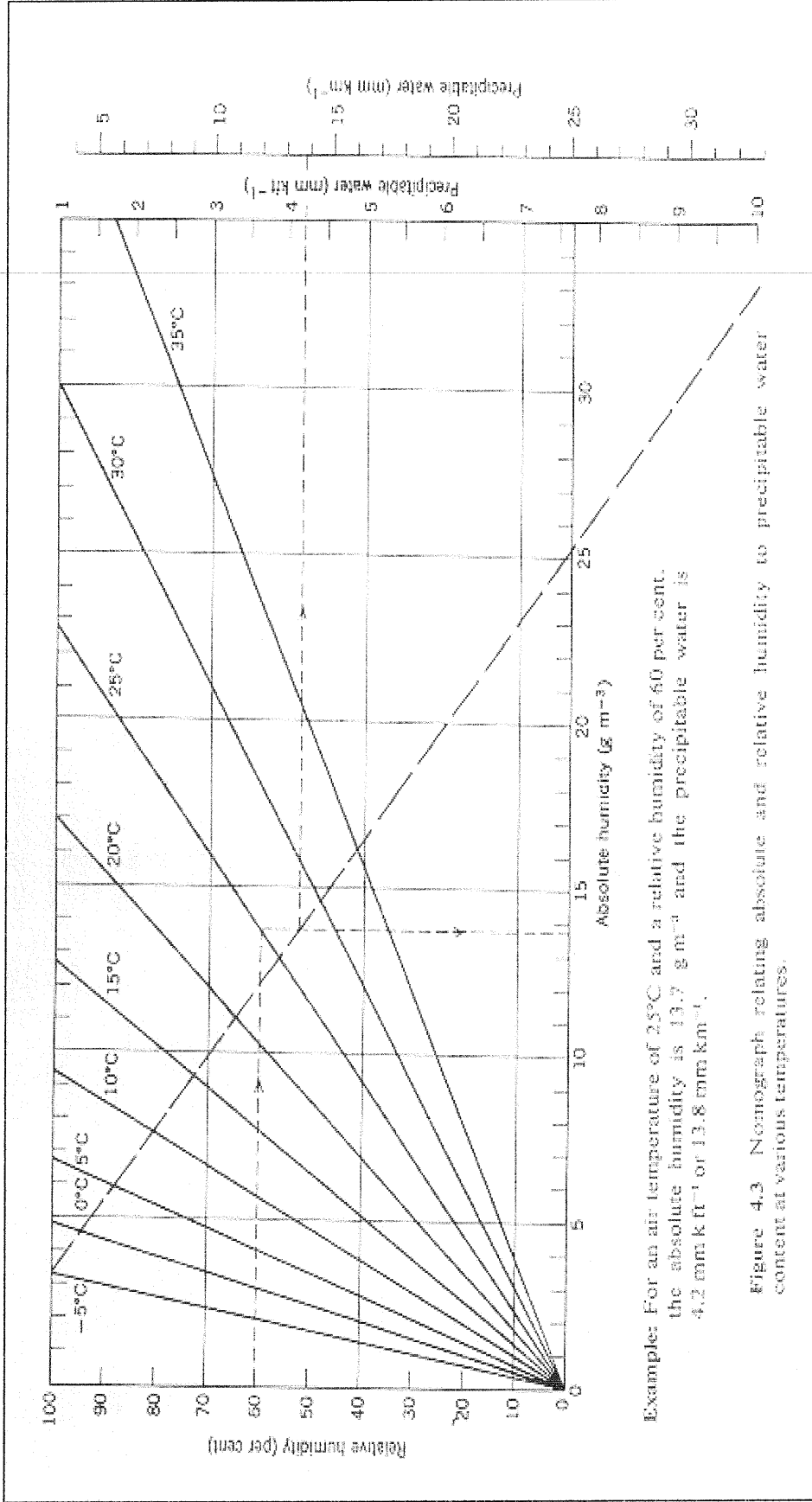
Belli bir sıcaklıkta, bağıl veya mutlak nem bilindiği takdirde, çökelti suyun hesaplanacağı bir dönüşüm grafiği Şekil 4.3.'de sunulmuştur [17].

EK-1'te sunulan tablodaki 0,2 mm, 0,5 mm, 1 mm, 2 mm, 5 mm, 10 mm, 20 mm, 50 mm, 100 mm ve 200 mm çökelti su değerlerinin her biri için verilen 8,0–12,0 μm atmosferik geçirgenlik değerlerinin aritmetik ortalamasını alırsak Çizelge 4.4.'te verilen geçirgenlik değerleri elde edilir.

Çizelge 4.4. 8–12 μm dalga boyu aralığında çökelti su miktarlarına göre atmosferik geçirgenlik değerleri

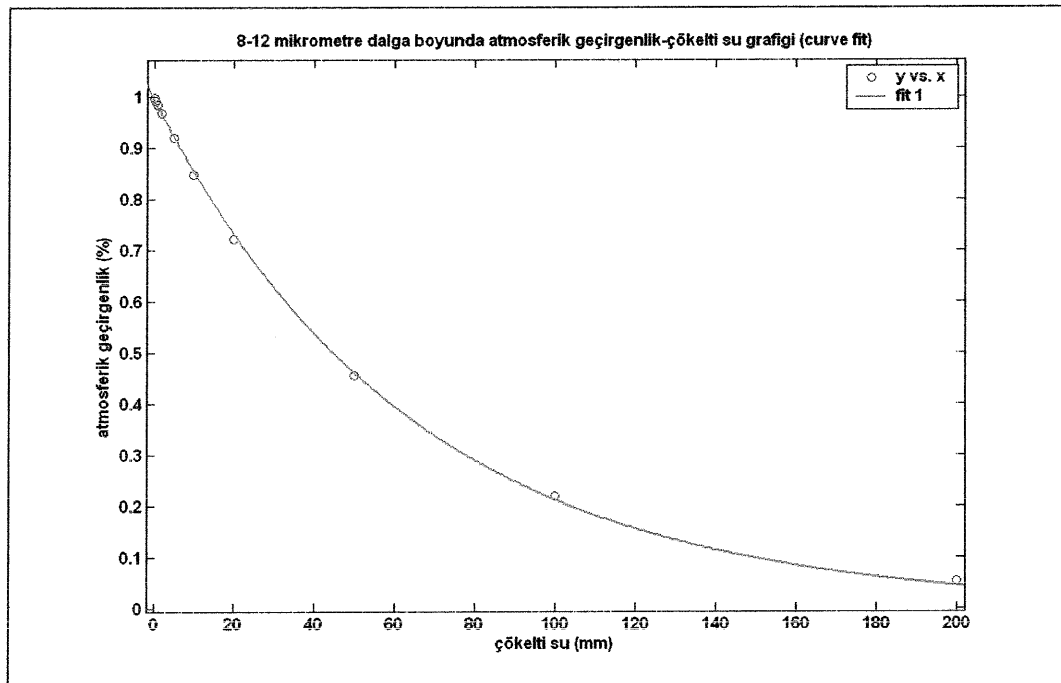
		Su Buharı Miktarı (Çökelti Su milimetre)									
		0,2	0,5	1	2	5	10	20	50	100	200
8–12 μm Dalga Boyu Ortalama Atmosferik Geçirgenlik Değerleri		0,997	0,992	0,983	0,967	0,921	0,849	0,723	0,457	0,221	0,055

Çizelge 4.4.'te elde edilen veriler kullanılarak, çökelti su kalınlığına bağlı olarak atmosferik geçirgenliğin değişimi grafiği Matlab programı ile çizilirse ve Eğri Uyumlama (Exponential Curve Fitting) işlemi uygulanırsa Şekil 4.4. elde edilir.



Şekil 4.3. Bağlı nem ve sıcaklığa bağlı olarak çökelti su miktarının değişimi

Şekil 4.4.'te eğri uyumlama yapılmış olan grafiğin eşitliği $y=a.exp(b.x)$ şeklinde elde edilir. Burada $a=0,996$ ve $b=-0,01541$ 'dir. Şekil 4.4.'ten de görüldüğü gibi çökelti su kalınlığı arttığında atmosferik geçirgenlik azalmaktadır. Örneğin, 0,2 mm çökelti su için geçirgenlik 0,99294 olurken, 10 mm çökelti su için bu değer 0,85376'a, 100 mm çökelti su için 0,21331'e kadar düşmektedir.



Şekil 4.4. 8–12 μm dalga boyu aralığında çökelti su-atmosferik geçirgenlik grafiği (eğri uyumlama yapılmış, R-square=0,9997)

Çeşitli sıcaklık ve nem değerleri için çökelti su ve atmosferik geçirgenlik değerlerinin incelenmesi

Şekil 4.3.'den çeşitli sıcaklık ve her bir sıcaklıktaki çeşitli bağıl nem değerleri için gerçek nem miktarları bulunacak olursa, bu sıcaklık ve mutlak nem değerinde bulunan çökelti su kalınlığı da bulunabilir. Örneğin 5° C sıcaklık %10 bağıl nem değeri için gerçek nem $0,8 \text{ g.m}^{-3}$ olarak bulunabilir. Bu sıcaklık ve mutlak nem değerleri için çökelti su kalınlığı $1,2 \text{ mm.km}^{-1}$ olarak bulunur.

Şekil 4.4.'teki grafiğin eşitliğinde çökelti su değeri yerine konulacak olursa atmosferik geçirgenlik 0,9778 olarak bulunur. Yapılan bu işlemler 5° C'den 35° C'ye kadar sıcaklık ve %10'dan %90'a kadar bağıl nem değeri için uygulanırsa, 5° C, 10° C, 15° C, 20° C, 25° C, 30° C ve 35° C sıcaklık için elde edilen bağıl nem-atmosferik geçirgenlik çizelgeleri EK-3 olarak bulunur.

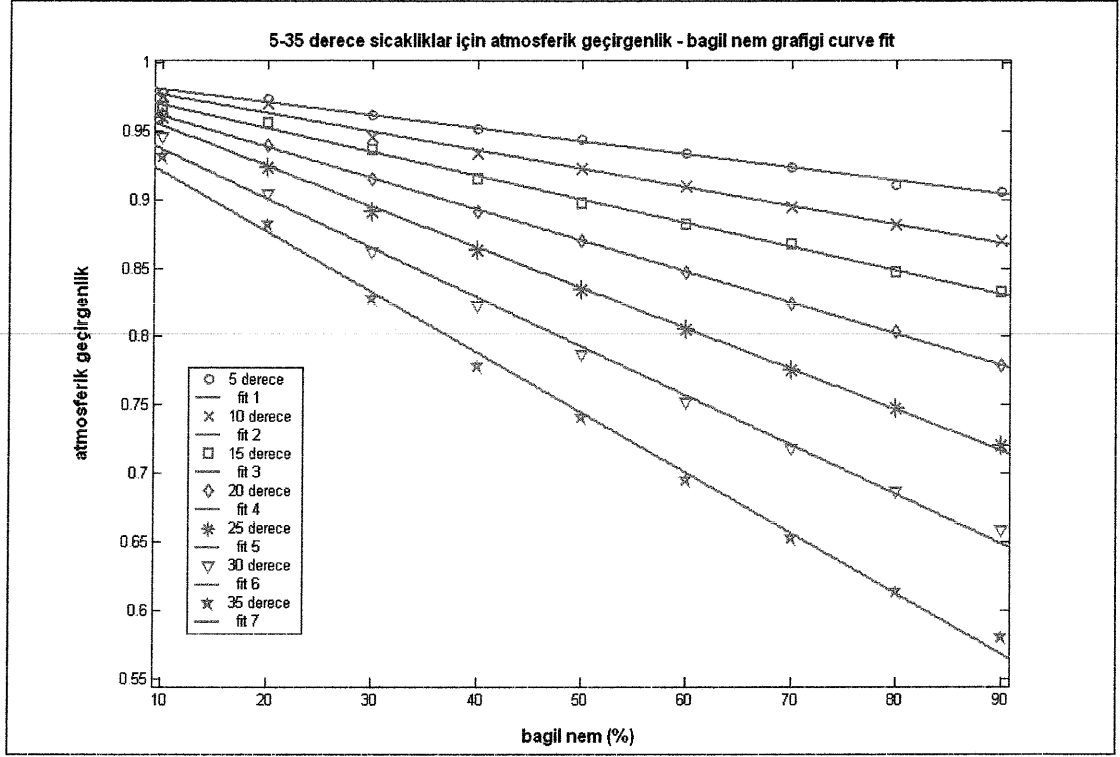
EK-3'te verilen, 5° C–35° C sıcaklık değerleri için oluşturulan bağıl nem-atmosferik geçirgenlik çizelgelerine Doğrusal Eğri Uyumlama (Lineer Polynomial Curve Fitting) uygulanacak olursa Çizelge 4.5. ile verilen değerler elde edilir.

Çizelge 4.5.'de 5° C, 10° C, 15° C, 20° C, 25° C, 30° C ve 35° C sıcaklık için çizilmiş tüm eğri uyumlama yapılmış bağıl nem-atmosferik geçirgenlik grafiklerinin tamamı aynı düzlemde toplanarak üst üste çizilecek olursa Şekil 4.5. elde edilir.

Çizelge 4.5. ve Şekil 4.5.'ten de açık bir şekilde görülebildiği gibi atmosferik geçirgenlik bağıl nem ve sıcaklık arttıkça azalmaktadır. Örneğin, 5° C sıcaklık için % 10 bağıl nem miktarı için atmosferik geçirgenlik 0,9803 iken, % 40 bağıl nem için bu değer 0,9518, % 70 bağıl nem için 0,9233, % 90 bağıl nem için 0,9042 olmaktadır. Yani sabit bir sıcaklıkta, bağıl nem arttıkça atmosferik geçirgenlik azalmaktadır. Eğer nem değerini sabit tutarak sıcaklığı değiştirirsek, atmosferik geçirgenliğin gene azaldığını görebiliriz. Örneğin, %20 bağıl nem değeri için, 5° C sıcaklık için geçirgenlik 0,9708 olurken, 15° C sıcaklık için bu değer 0,9517, 25° C sıcaklık için 0,9244, 35° C sıcaklık için 0,8765 olmaktadır. Yani, sabit bir bağıl nem değerinde sıcaklık arttıkça, atmosferik geçirgenlik azalmaktadır. Sıcaklık ve nemin özellikle 20° C sıcaklık ve % 40 bağıl nem üzeri sıcaklık ve bağıl nem değerlerinde atmosferik geçirgenliği çok etkilediği görülmektedir. Örneğin, 35° C sıcaklık % 90 bağıl nem değerinde geçirgenlik 0,5690'a kadar düşmektedir.

Çizelge 4.5. 5° C–35° C sıcaklık aralığında doğrusal eğri uyumlama sonrası değerler

Sıcaklık	Eşitlik	10	20	30	40	50	60	70	80	90
5° C	Y=P1.X+P2									
	P1=-0,0009507	0,9803	0,9708	0,9613	0,9518	0,9423	0,9328	0,9233	0,9137	0,9042
	P2=0,9898									
	R-square=0,9947									
10° C	Y=P1.X+P2									
	P1=-0,001352	0,9764	0,9629	0,9493	0,9358	0,9223	0,9088	0,8953	0,8817	0,8682
	P2=0,9899									
	R-square=0,9925									
15° C	Y=P1.X+P2									
	P1=-0,001723	0,9690	0,9617	0,9345	0,9173	0,9001	0,8828	0,8656	0,8484	0,8311
	P2=0,9862									
	R-square=0,9976									
20° C	Y=P1.X+P2									
	P1=-0,002266	0,9608	0,9382	0,9155	0,8929	0,8702	0,8475	0,8249	0,8022	0,7796
	P2=0,9835									
	R-square=0,9997									
25° C	Y=P1.X+P2									
	P1=-0,002955	0,9540	0,9244	0,8949	0,8653	0,8357	0,8062	0,7767	0,7471	0,7176
	P2=0,9835									
	R-square=0,9987									
30° C	Y=P1.X+P2									
	P1=-0,003587	0,9365	0,9007	0,8648	0,8289	0,7931	0,7572	0,7213	0,6854	0,6496
	P2=0,9724									
	R-square=0,9962									
35° C	Y=P1.X+P2									
	P1=-0,004393	0,9205	0,8765	0,8326	0,7887	0,7448	0,7008	0,6569	0,6130	0,5690
	P2=0,9644									
	R-square=0,9961									



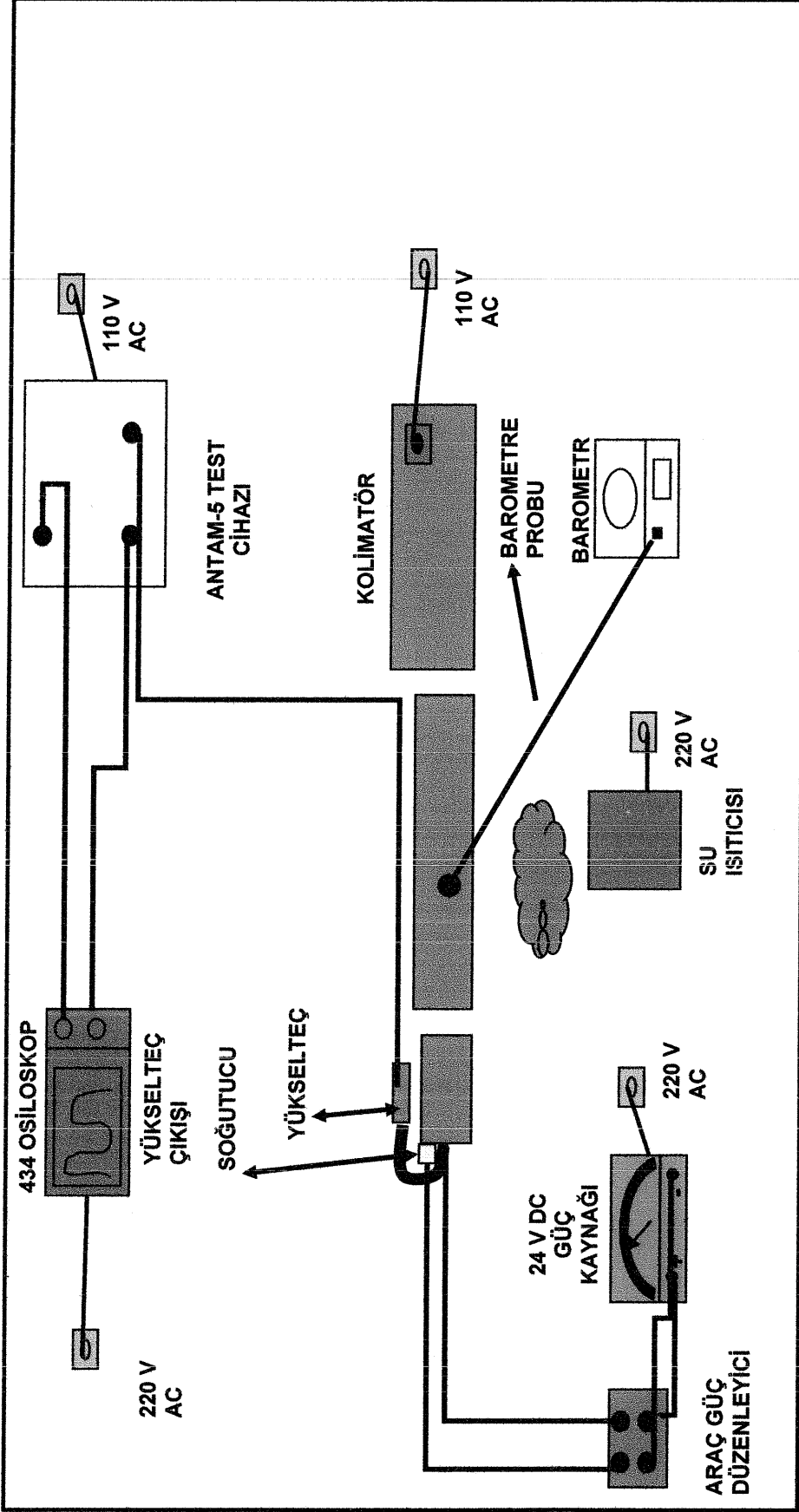
Şekil 4.5. 5° C–35° C sıcaklık aralığında eğri uyumlama yapılmış atmosferik geçirgenliğin bağıl nem ile değişimi grafiği

5. SU BUHARININ ATMOSFERİK GEÇİRGENLİĞE ETKİSİNİN DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ

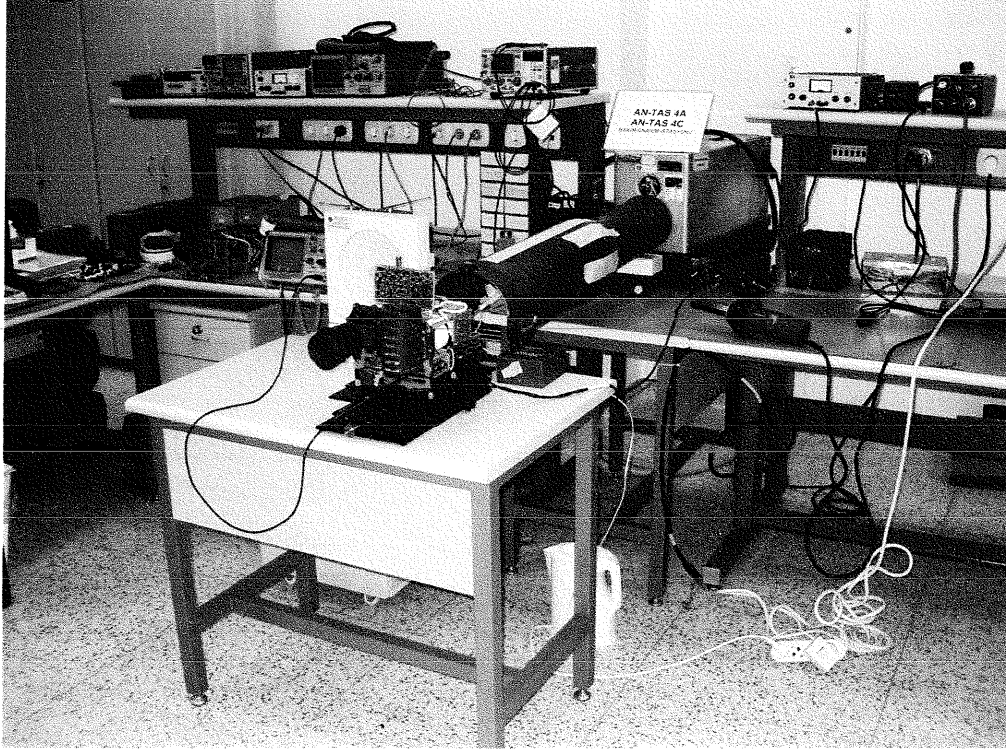
Bu çalışmada, su buharının atmosferik geçirgenliğe, dolayısıyla termal kameraların performansına etkisinin görülmesi maksadıyla, K.K.K.ığı envanterinde uzun menzilli tanksavar silahı olarak kullanılan, TOW Silah Sisteminin muhteviyatında bulunan AN/TAS-4A gece görüş cihazı kullanılarak, çeşitli nem değerlerinde ölçümler yapılması hedeflenmiştir. Bu maksatla, ilk deneysel çalışmada Kara Kuvvetleri Lojistik Komutanlığına bağlı olarak, K.K.K.ığı envanterinde bulunan elektro-optik bazlı cihaz, silah ve atış kontrol sistemlerinin bakım, onarım ve kalibrasyonundan sorumlu olan EOSBM.Md.lüğü Füze Sistemleri Bölümü TOW kısmı imkân ve kabiliyetlerinden faydalanılmıştır. Burada ortam sıcaklığı değişmeden, sadece termal kamera önüne koyulan bir su ısıtıcından elde edilen buharın, termal kamera önüne tutulmasıyla yükselteç çıkış voltajındaki değişim incelenmiştir. EOSBM.Md.lüğünde yapılan çalışmada su buharının yanı sıra azot, argon ve helyum gazları ile aynı deneyler tekrarlanmıştır. Su buharı ile birlikte, sıcaklığın da termal kamera performansına etkisinin incelenmesi için, aynı deneyler Aselsan A.Ş.'nde bulunan iklimlendirme kabini kullanılarak tekrarlanmıştır. Yapılan ikinci deneyde, su buharı ve sıcaklık, kontrollü değiştirilerek, termal kamera dedektör, önyükselteç ve yükselteç çıkış voltajları ölçülmüştür. Deneysel çalışmalarda, termal kameranın hedefindeki, bağıl nem arttıkça görüntünün netliğinin azaldığı gözlenmiştir. Ancak, literatürde bulunan çalışmalarla herhangi bir karşılaştırma yapılamayacağından çekilen fotoğraflar bu çalışmaya eklenmemiştir.

5.1. Kara Kuvvetleri Elektro-Optik Sistemler Bakım Merkezi Müdürlüğünde Yapılan Çalışmalar

Kara Kuvvetleri Elektro-Optik Sistemler Bakım Merkezi Müdürlüğünde kullanılan deney düzeneğinin bağlantı şeması Şekil 5.1.'de sunulmuştur. Deney düzeneği ise Resim 5.1.'de gösterilmiştir. Bu deneyde, bir su ısıtma



Şekil 5.1. EOSBM.Md.lüğünde kullanılan deney düzeneğinin bağlantı şeması



Resim 5.1. Elektro-Optik Sistemler Bakım Merkezi Müdürlüğünde kullanılan deney düzeneği

cihazı yardımıyla oluşturulan su buharının, AN/TAS-4A gece görüş cihazı ile siyah cisim olarak kullanılan AN/TAM-3A test cihazı kolimatörü arasındaki bölgeye yönlendirilerek, termal kamera ile hedef arasındaki bölgedeki, artan nem değerleri ile birlikte yükselteç çıkış voltajının değişimi osiloskop yardımıyla ölçülmüştür.

5.1.1. Deneyde kullanılan cihazlar

AN/TAS-4A gece görüş cihazı

Gece görüş cihazının teknik özellikleri [18] aşağıda verilmiştir.

Nominal Büyütme

Geniş Saha

4X

Dar Saha	12X
Minimum Odak Uzunluğu	50 metre(Her iki görüş sahası için)

Görüş Açısı

Geniş Dikey	3,4 ± 0,3 derece (59,3 ± 5,2 miliradyan)
Geniş Yatay	6,8 ± 0,6 derece (118,7 ± 10,5 miliradyan)
Dar Dikey	1,1 ± 0,1 derece (19,2 ± 1,7 miliradyan)
Dar Yatay	2,2 ± 0,2 derece (38,4 ± 3,5 miliradyan)

Uzaysal Çözünürlük

Geniş Saha	0,5 miliradyan
Dar Saha	0,167 miliradyan
Minimum Çözünme Derecesi	0,15 ° C
Dedektör Sayısı	60 (56 tanesi görüntüleme ve izleme maksadıyla kullanılıyor)
Algılama Dalga Boyu	7,5 – 11,6 milimetre
Dedektör Çalışma Sıcaklığı	-193° C (80° K)
Soğuma Zamanı	6,5 dakika
Algılama Süresi	15 saniyeden az
Batarya Ömrü	12 saat

Genel çalışma prensibi

AN/TAS-4A gece görüş cihazı bir hedef bölgesinden kızılötesi enerjiyi alarak, elektriksel sinyallere çevirmektedir. Bu sinyaller yükseltilerek, önce video sinyallerine daha sonra da ışık yayan diyotlar (LED) vasıtasıyla gerçek zamanlı görünür ışığa dönüştürülmektedir.

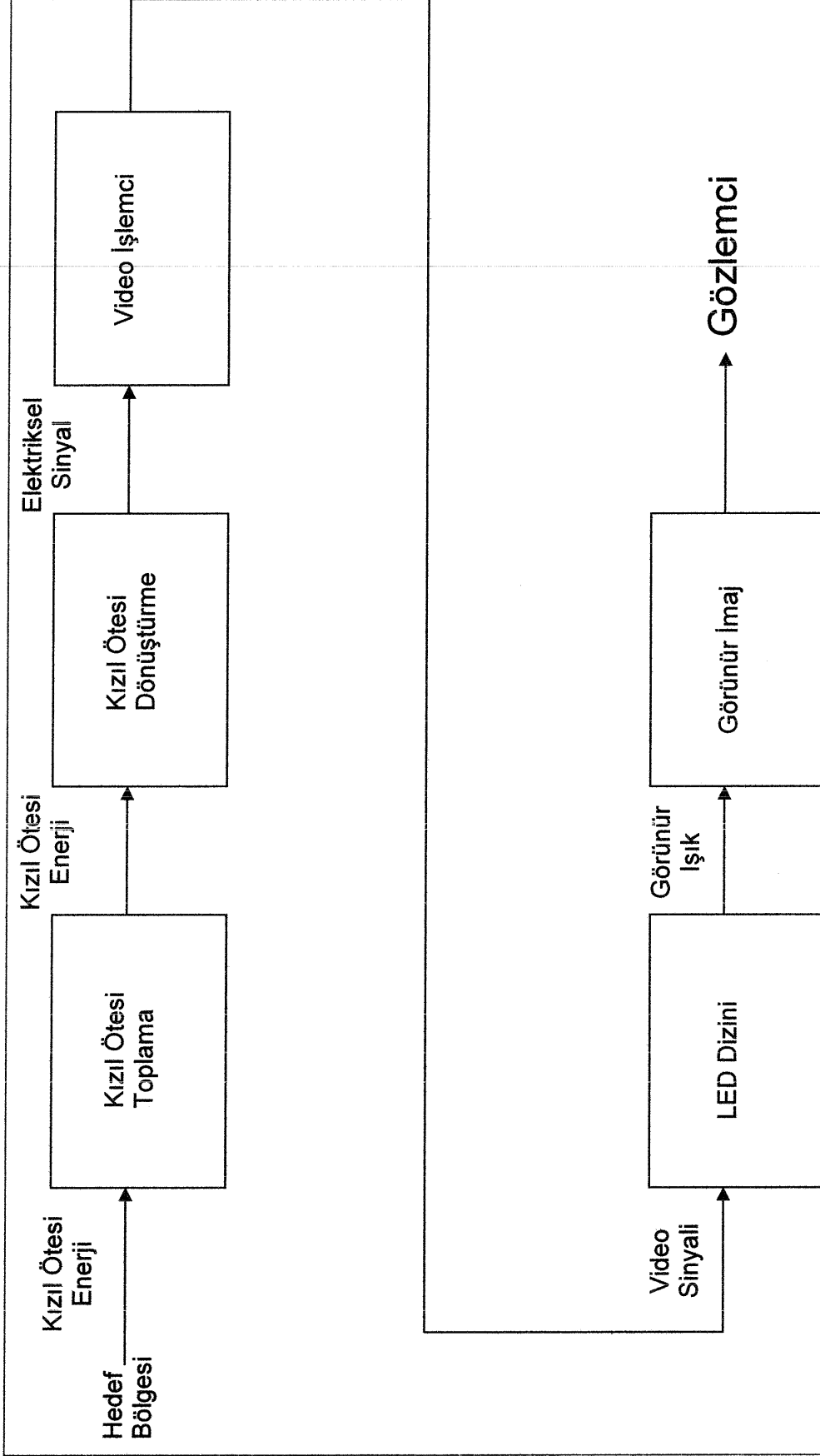
Gece görüş cihazı, hem kızılötesi hem görünür ışık optik camlarını içeren bir elektro-optik sistemdir. Odak dışı optik takımı (Afocal Assembly Optics) kızıl

ötesi enerjiyi toplar ve bunu tarayıcı ayna (Scan Mirror) üzerine düşürür. Her iki büyütme de kullanılabilir. Kızılötesi görüntü optiği (IR Imager Optics), tarayıcı ayna üzerindeki kızılötesi enerjiyi odaklayarak, kızılötesi dedektörlerin üzerine düşürür. Dedektörler kızılötesi enerjiyi video sinyallerine çevirirler. Video sinyalleri, video elektronikleri (Video Electronics) tarafından işlenirler. Video, bir yayıcı takım (Emitter Assembly) tarafından görünür ışığa dönüştürülürler. Görsel kolimatör, yayıcı takımdaki görünür ışığı, tarayıcı ayna üzerine transfer eder. Objektif lens / çatı ayna optik takımları (Objective Lens (Roof Mirror Assembly Optics) görüntülemek amacıyla bu ışığı ekrana yönlendirir. AN/TAS-4A gece görüş cihazının blok diyagramı Şekil 5.2.'de, genel çalışma prensibi ise Şekil 5.3.'de verilmiştir.

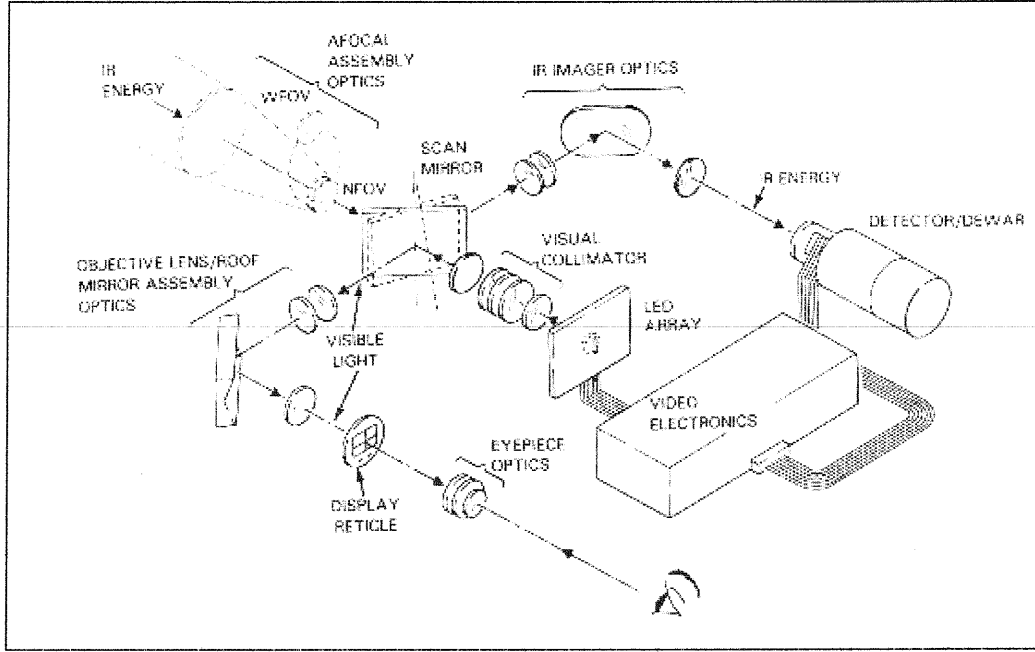
Dedektör

AN/TAS-4A gece görüş cihazında kullanılan kızılötesi dedektör ve soğutucu (cooler) Şekil 5.4.'de gösterilmiştir.

Şekil 5.4.'de görülen kızılötesi dedektör dizini ilk gelen kızıl ötesi enerjiyi, elektriksel video sinyallerine dönüştürmektedir. Dedektör, çok elemanlı bir dizin olup, izoleli bir vakum içerisinde bulunmaktadır. Bu izolasyonlu vakum dedektör için gerekli sıcak-soğuk ortamı oluşturmaktadır. Soğutucu takımı mekanik olarak, dedektörün içerisine, soğuk parmak ile dedektör dizini arasında küçük bir boşluk bırakacak şekilde girmektedir. Dedektör, civa kadmiyum telürid (HgCdTe) kızılötesi dizini içermektedir. Bu dedektör dizini konektör uçlarına bağlanmaktadır. Bu konektörler, dedektör harici olarak önyükselteç modüllerine bağlanmaktadır. Dedektör, monolitik 60 aktif elemanlı bir HgCdTe foto iletken dedektör dizininden oluşmaktadır [19].



Şekil 5.2. AN/TAS-4A gece görüş cihazı genel çalışma prensibi blok şeması



Şekil 5.3. AN/TAS-4A gece görüş cihazı genel çalışma prensibi

AN/TAM-3A test seti

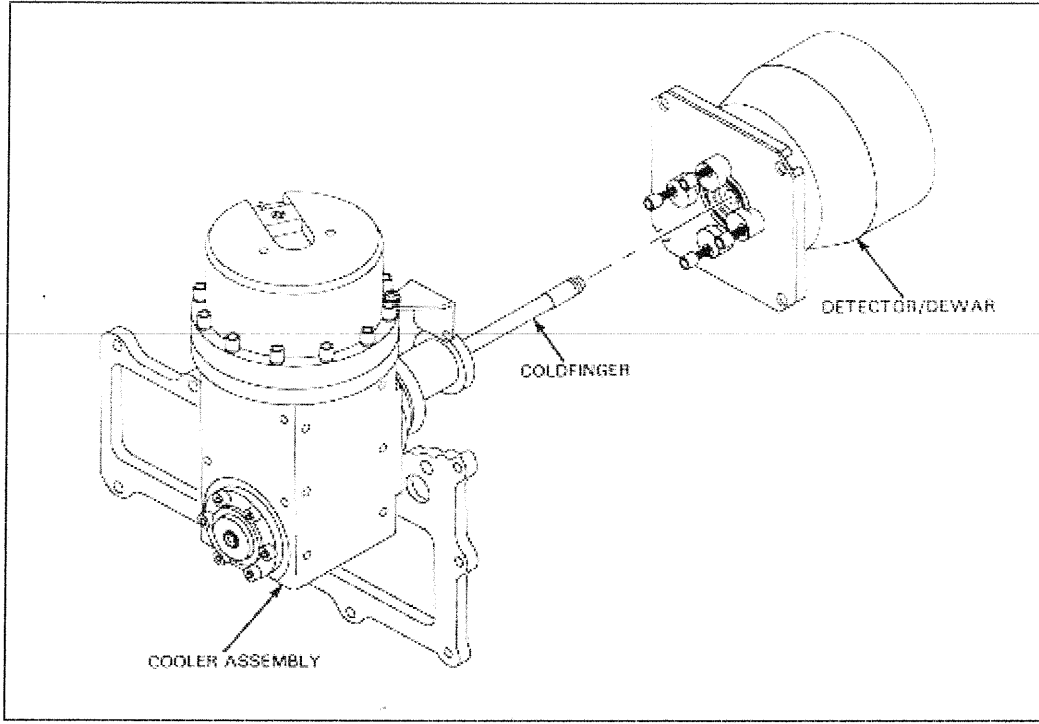
AN/TAM-3A test seti, gece görüş cihazlarının bakım ve onarımında kullanılmaktadır. Bu test seti ile, minimum çözünme sıcaklığını, modülasyon, kazanç dengesini, arızalı kanalların tespitini, akım, gerilim ve direnç ölçümlerini yapabilir; elektriksel ayarını, sıfırlama ayarını, akü şarj cihazı şarj akımını ve soğutucunun görev yapıp yapmadığını anlayabiliriz.

Mekanik fonksiyonların test edildiği cihazın (UUT) monte sehpası

UUT monte sehpası yatay ve dikey yönde hareket edebilen platformlara sahip bir sehpadır. Her iki yönde de ± 4 derece limitlerle hareket edebilir. UUT Monte Sehpa Şekil 5.5. olarak gösterilmiştir.

Mekanik fonksiyonlar kolimatör

Kolimatörün mekanik fonksiyonu, sıcaklık kontrolü üzerinde bulunan hedef

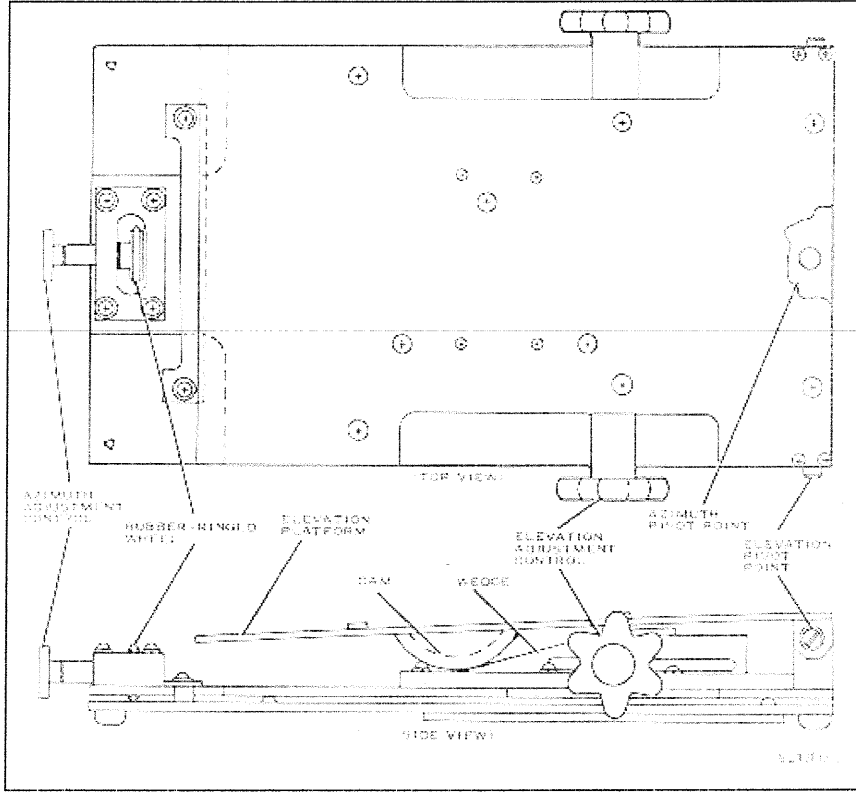


Şekil 5.4. Gece görüş cihazı dedektör ve soğutucusu

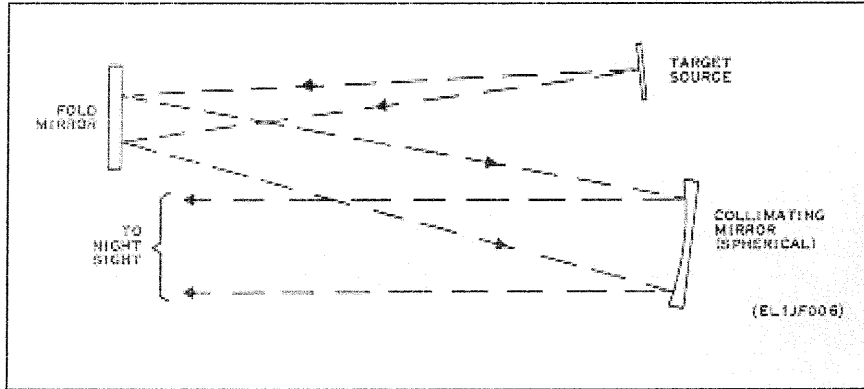
seçme kontrol anahtarının döndürülmesini sağlamaktır. Bunun amacı, test esnasında termal görüş için 6 adet plakadan birinin seçimini kolaylaştırmaktır.

Optik fonksiyonlar kolimatör

Kolimatör sıcaklık kontrolü ve hedef kaynak takımından gelen kızılötesi ışık demetlerini toplar. Kolimatör aynasının odak uzunluğu 58 inçtir. Hedef kaynağından (Target Source) gelen kızılötesi ışık demetleri kıvrımlı bir ayna (fold mirror) tarafından kolimatör aynasından yansıtılarak gece görüş cihazı üzerine düşürülür. Kıvrımlı ayna 58 inç olan odak uzunluğunu daha kısa bir mesafeye düşürmek için kullanılır. Küresel kolimatör aynası kızıl ötesi ışık demetlerini birbirine paralel olarak yansıtır. Şekil 5.6.'da ışık demetinin izlediği optik yol gösterilmiştir.



Şekil 5.5. Test edilen cihaz (UUT) monte sehpası



Şekil 5.6. Işık demetinin izlediği optik yol

Optik fonksiyonlar hedef kaynağı

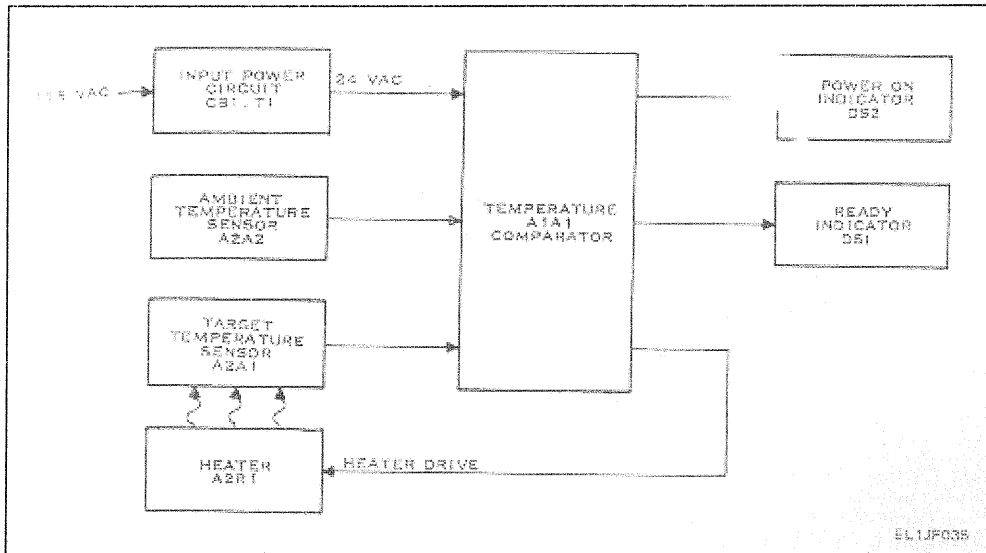
Hedef Kaynağı, kızıl ötesi ışığı oluşturur ve kolimatörün odak noktasında bulunur. Kolimatör üzerinde gece görüş cihazının testi için gerekli çeşitli hedef tiplerinin oluşturulması amacıyla kullanılır.

Elektronik devre ve PWB fonksiyonları sıcaklık kontrolü ve hedef kaynağı takımı devresi

Sıcaklık Kontrolü ve Hedef Kaynağı Takımının Blok Diyagramı Şekil 5.7 olarak gösterilmiştir.

Sıcaklık Kontrolü ve Hedef Kaynağı Takımı, hedef kaynağı ve ortam sıcaklığı arasındaki sıcaklık farkının kontrolünü sağlar. 4,5° C'lik sıcaklık farkı, hedef kaynağının sıcaklığının algılanması ve ortam sıcaklığına uygun olarak, bir ısıtıcı vasıtasıyla regüle edilmesiyle sağlanır.

A2A1 sıcaklık sensörü hedefin sıcaklığını ve A2A2 ortam sıcaklığını algılar. İki sensör arasındaki gerilim farkı, sıcaklık karşılaştırıcısına (temperature comparator) gider ve A2R1 ısıtıcısının akımını ayarlar. 4,5° C'lik ısı farkı sağlandığında, DS1 hazır (ready) LED'i yanar [20].



Şekil 5.7. Sıcaklık kontrolü ve hedef kaynağı takımının blok diyagramı

Sıcaklık ve nem ölçer

Omega marka, hem sıcaklık hem de bağıl nem ölçebilen ve aynı zamanda 7 gün 24 saat kayıt yapabilen bir cihazdır.

Osiloskop ve güç kaynağı

Dedektör çıkış geriliminin ölçülmesi maksadıyla Tektronix 434 Marka Hafızalı Osiloskop (Storage Oscilloscope) kullanılmıştır. Test setine ve gece görüş cihazına gerekli olan 24 V DC gerilimi sağlayabilmek maksadıyla 1 adet Güç Kaynağı kullanılmıştır.

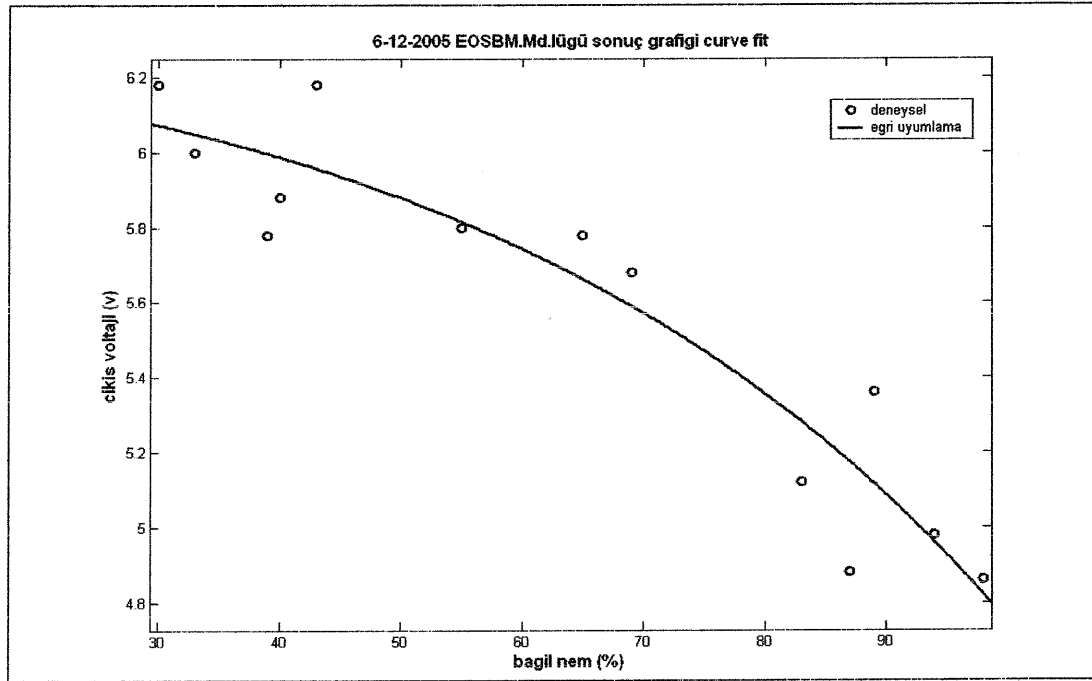
5.1.2. Deney düzeneğinin çalışma prensibi ve deney sonuçları

Deney düzeneğinde, 24 V DC güç kaynağı kullanılarak, araç güç düzenleyicisi vasıtasıyla, gece görüş cihazının tarayıcısına 4,8 V DC, soğutucusuna ise 16,8 V DC verilmiştir. Böylelikle, termal gece görüş cihazının çalışması sağlanmıştır. Kaynak olarak AN/TAM-3A test setinin kolimatörü kullanılmıştır. Bu kolimatör, bir çeşit siyah cisim görevi yapmaktadır. Barometre cihazının probu termal gece görüş cihazı ile kolimatör arasına konularak aradaki nem değerinin ölçülmesini sağlamıştır. Su ısıtıcısı tarafından üretilen su buharı, direkt olarak, gece görüş cihazı ile test cihazı arasına verilerek, çeşitli nem değerleri için yükselteç çıkış geriliminin tepe değerleri ölçülmüştür. Yükselteç çıkış voltajının ölçülmesi için yükselteçten AN/TAM-3A cihazına bağlantı, test setinin W1 P2 kablosu ile yapılmıştır. AN/TAM-3A cihazından ise osiloskoba üç adet prob ile bağlantı yapılmıştır. Eş zamanlı olarak barometrenin gösterdiği bağıl nem değeri ile osiloskop üzerinde görülen yükselteç çıkış voltajının tepe değeri okunmuştur. Yapılan ölçümler 20 derece sabit sıcaklıkta yapılmıştır. Yapılan ölçümler sonucunda Çizelge 5.1.'te gösterilen nem değerlerine karşılık yükselteç çıkış voltaj değerleri elde edilmiştir.

Çizelge 5.1. Deney sonucunda değişik bağıl nem değerleri için elde edilen yükselteç çıkış tepe gerilimleri

Bağıl Nem (%)	30	33	39	40	43	55	65	69	83	87	89	94	98
Yükselteç Çıkış Gerilimi	6,18	6	5,78	5,88	6,18	5,8	5,78	5,68	5,12	4,88	5,36	4,98	4,86

Çizelge 5.1.'teki değerler kullanılarak çizilecek olan yükselteç tepe geriliminin bağıl nem ile değişim grafiğine, üssel eğri uyumlama yapılmış $y=a.exp(b.x)+c.exp(d.x)$ eşitliği elde edilmiştir. Burada $a=-0,1799$, $b=0,02248$, $c=6,425$ ve $d=5,494.e-005$ 'dir. Eğri uyumlama yapılarak elde edilen eğri, Şekil 5.8.'deki gibidir.



Şekil 5.8. 20 ° C sıcaklıkta değişik bağıl nem değerleri için elde edilen yükselteç çıkış tepe gerilimleri grafiği (eğri uyumlama yapılmış, R-square=0,8845)

Şekil 5.8.'den de görüldüğü gibi ortamdaki bağıl nem oranı arttıkça, yükselteç çıkış gerilimi azalmaktadır. Şekil 5.8.'de, bağıl nem %30 iken yükselteç çıkışı gerilimi 6,18 V iken bağıl nem %98'e çıktığında çıkış geriliminin 4,86 V'a

düştüğü görülmektedir. Bir başka deyişle, bağıl nem oranı %70 artarken yükselteç çıkışının %21 azaldığı tespit edilmiştir.

Aynı deney düzeneği, su buharı yerine Argon, Azot ve Helyum gazları için de kullanılmış ancak yükselteç çıkış geriliminde bir değişiklik gözlenmemiştir.

5.1.3. Deney sonuçlarının değerlendirilmesi

EOSBM.Md.lüğündeki çalışmalar 20 derece sıcaklıkta yapılmıştır. Bu sonuçları literatürdeki, Passman ve Larmore tarafından bulunan ve Çizelge 4.5.'te sunulan, atmosferik geçirgenlik değerlerinden sadece 20 derecedeki veriler dikkate alınarak karşılaştırma yapılmıştır. Passman ve Larmore tarafından yapılan çalışmada 20 derece %30 bağıl nem değerindeki geçirgenlik 0,9155'tir. Gene 20 derece %90 bağıl nem değeri için geçirgenlik 0,7796'dır. Yani 20 derecede, %30 bağıl nemden %90 bağıl nem değerine çıktığında, geçirgenlik % 14,84 azalmaktadır. EOSBM.Md.lüğünde yapılan ölçümlerde ise %30 bağıl nem değeri için yükselteç çıkış gerilimi 6,18 V, %90 nem değeri için yükselteç çıkış gerilimi ise 5,36 V bulunmuştur. Yani yükselteç çıkış gerilimi, bir başka deyişle, termal gece görüş cihazının performansını %13,26 azaltmaktadır. Görüldüğü gibi 20 derecede literatürde bulunan atmosferik geçirgenliğin azalma yüzdesi ile, EOSBM.Md.lüğünde yapılan deneysel çalışma sonucu bulunan çıkış voltajındaki azalma yüzdesi birbirine yakındır. Ancak, literatürde, 5-35 derece arasında, %10 bağıl nem değerinden %90 bağıl nem değerine kadar ölçüm sonuçları bulunmasına rağmen EOSBM.Md.lüğünde sadece 20 derecede ölçüm yapılabilmektedir. Bu sebeple, sıcaklık ve bağıl nemin kontrollü olarak kontrollü bir atmosferik ortam aranmıştır. Aselsan A.Ş. Macunköy tesislerinde bulunan ve üretimi yapılan elektronik temelli sistemlerin son kontrol testlerinin yapıldığı iklimlendirme kabininin bu maksatla kullanılabileceği tespit edilmiştir.

5.2. Aselsan A.Ş.'nde Yapılan Deneysel Çalışmalar

EOSBM.Md.lüğünde yapılan deney süresince sıcaklık değiştirilememiş ve sıcaklık değişiminin etkisi incelenememiştir. Ayrıca kullanılan su ısıtıcısından elde edilen su buharının çok istikrarlı olmamasından dolayı nem sabit tutulamamıştır. Ortamın sıcaklık ve neminin daha kararlı olarak ayarlanması ve ölçülmesi amacıyla Aselsan A.Ş. Macunköy tesislerinde bulunan iklimlendirme kabini kullanılmış, EOSBM.Md.lüğünde yapılan deneysel çalışmalar tekrarlanmıştır. Aselsan A.Ş.'nde yapılan çalışmada, yükselteç çıkış voltajının yanı sıra dedektör çıkış voltajı ve önyükselteç çıkış voltajı da ölçülmüştür. Bunun için termal gece görüş cihazının dış muhafazası çıkartılarak dedektörden ve önyükselteç kartlarının çıkışından direkt olarak ölçümler alınmıştır. Aselsan A.Ş.'nde, EOSBM.Md.lüğünde kullanılan deney düzeneğine ilave olarak dedektör ve önyükselteç çıkış gerilimlerini ölçmek için ilave bir osiloskop ta kullanılmıştır. Aselsan A.Ş.'nde kullanılan iklimlendirme kabini Resim 5.2.'de, söz konusu kabinin teknik özellikleri aşağıda sunulmuştur.

ACS WZH 13-B2 model iklimlendirme kabini teknik özellikleri

Model : ACS WZH 13-B2

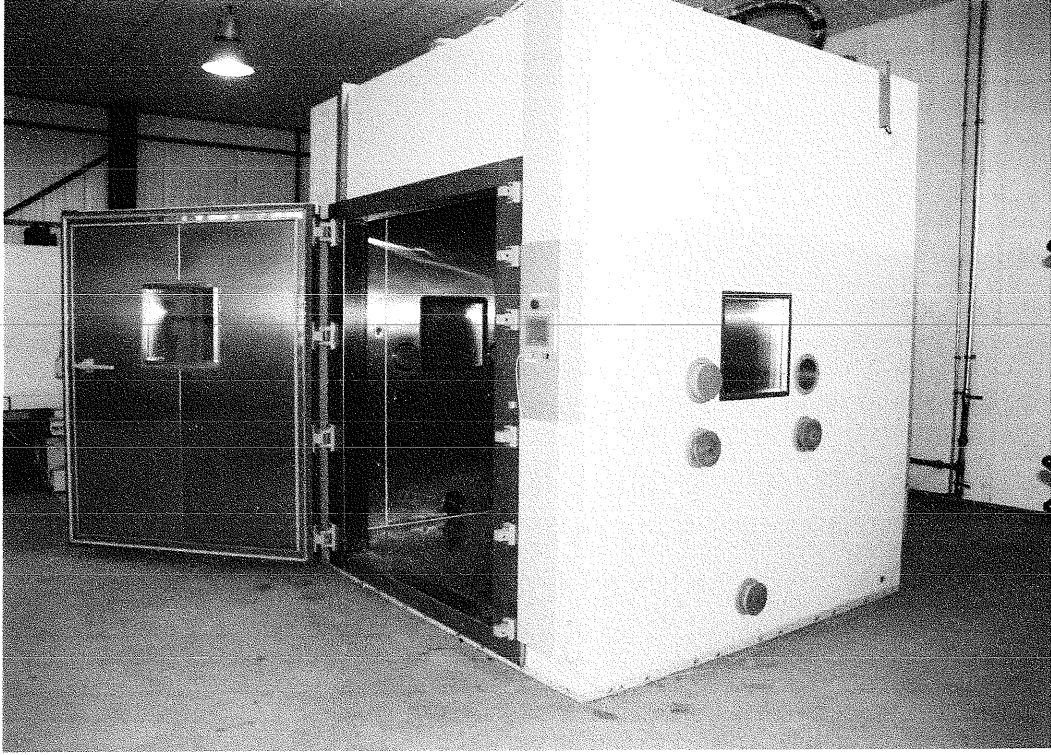
İç Boyutları (mm) : 2400 (W) x 2120 (D) x 2660 (H)

Kapı Boyutları : 1500 (W) x 2000 (H)

Sıcaklık Aralığı : - 60°C / +80°C

Isıtma Hızı : 1,5°C/dak , -60°C to +80°C

Soğutma Hızı : 1,5°C/dak , +80°C to -60°C



Resim 5.2. ACS WZH 13-B2 model iklimlendirme kabini

Sıcaklık Kararlılığı : $\pm 1^{\circ}\text{C}$

Nem Aralığı : 10% - 95%

Uygulanan standartlar

MIL-STD-810F, Method 501.4 Yüksek Sıcaklık

MIL-STD-810F, Method 502.4 Düşük Sıcaklık

MIL-STD-810F, Method 507.4 Nem

Uygulama Alanı : Büyük hacimli birim, alt sistemlerin Sıcaklık /Nem Testi

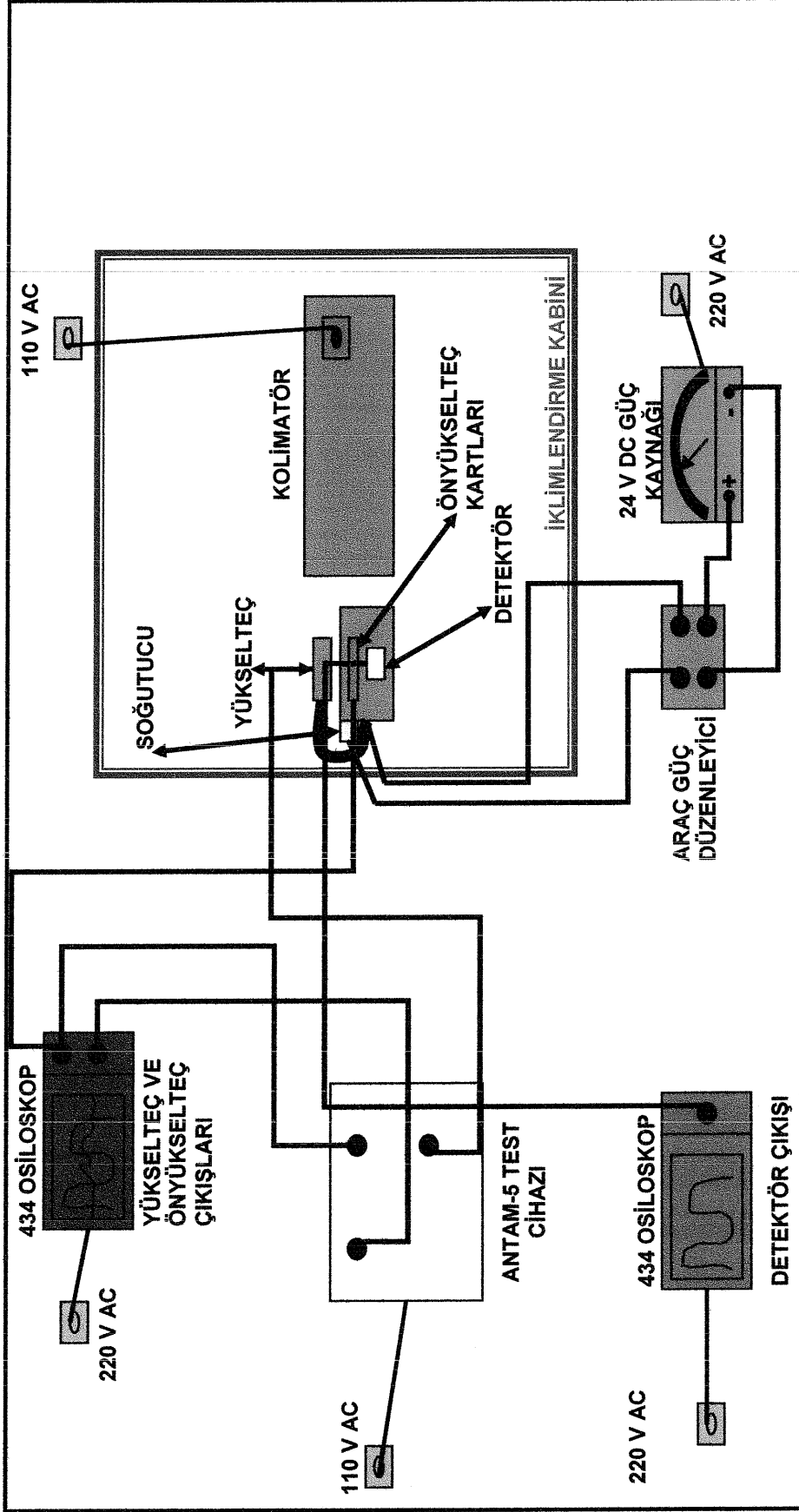
Aselsan A.Ş.'nde yapılan deneysel çalışmaların sonucunda çeşitli sıcaklık ve nem değerlerinde termal gece görüş cihazı dedektör, önyükselteç ve yükselteç çıkış gerilimlerinin tepe değerlerinin ölçülmesi hedeflenmiştir. Bu kapsamda, Şekil 5.9.'da bağlantı şeması, Resim 5.3.'de de resmi verilen deney düzeneği kurulmuştur. Aselsan A.Ş.'nde kurulan deney düzeneğinin çalışma prensibi EOSBM.Md.lüğünde kurulan deney düzeneğinin benzeridir. Tek farklılık su ısıtıcısı yerine iklimlendirme kabininin kullanılması ve yükselteç çıkışları ile birlikte dedektör ve önyükselteç çıkış gerilimlerinin de ölçülebilmesidir.

Aselsan A.Ş.'nde 5° C, 10° C, 15° C, 20° C, 25° C, 30° C ve 35° C sıcaklık değerlerinin her biri için bağıl nem oranı % 10'dan % 90'a kadar değiştirilmiştir. Her bir sıcaklık ve nem değeri için dedektör çıkış voltajı, önyükselteç çıkış voltajı ve yükselteç çıkış voltajı, iki osiloskop vasıtasıyla ölçülmüş ve elde edilen değerler ile ölçüm saatlerini gösteren çizelgeler EK-4'te sunulmuştur.

EK-4'te sunulan 5–35° C için bulunan dedektör çıkış voltajı, önyükselteç çıkış voltajı ve yükselteç çıkış voltajı değerleri için bağıl nem geçirgenlik grafikleri çizilmiş ve çizilen grafik için eğri uyumlaması yapılarak olursa EK-5'de bulunan çizelgeler elde edilmiştir. Aselsan A.Ş.'ndeki iklimlendirme kabininde, 5–35° C sıcaklık ve %10–90 bağıl nem değerleri arasında yapılan deneysel çalışmalara eğri uyumlaması yapılarak bir grafikte toplanmıştır. Bağıl nem-dedektör çıkışı Şekil 5.10., bağıl nem-önyükselteç çıkışı Şekil 5.11. ve bağıl nem-yükselteç çıkışı grafiği ise Şekil 5.12. olarak sunulmuştur.

5.2.1. Aselsan A.Ş.'nde yapılan çalışma sonuçlarının değerlendirilmesi

Şekil 5.10. incelendiğinde, 5–30° C sıcaklık değerleri için sıcaklık arttıkça çıkış geriliminin azaldığı görülmektedir. Sadece 35° C sıcaklık için bir azalma olmamıştır. Ayrıca her sıcaklık değeri için bağıl nem oranı arttıkça çıkış

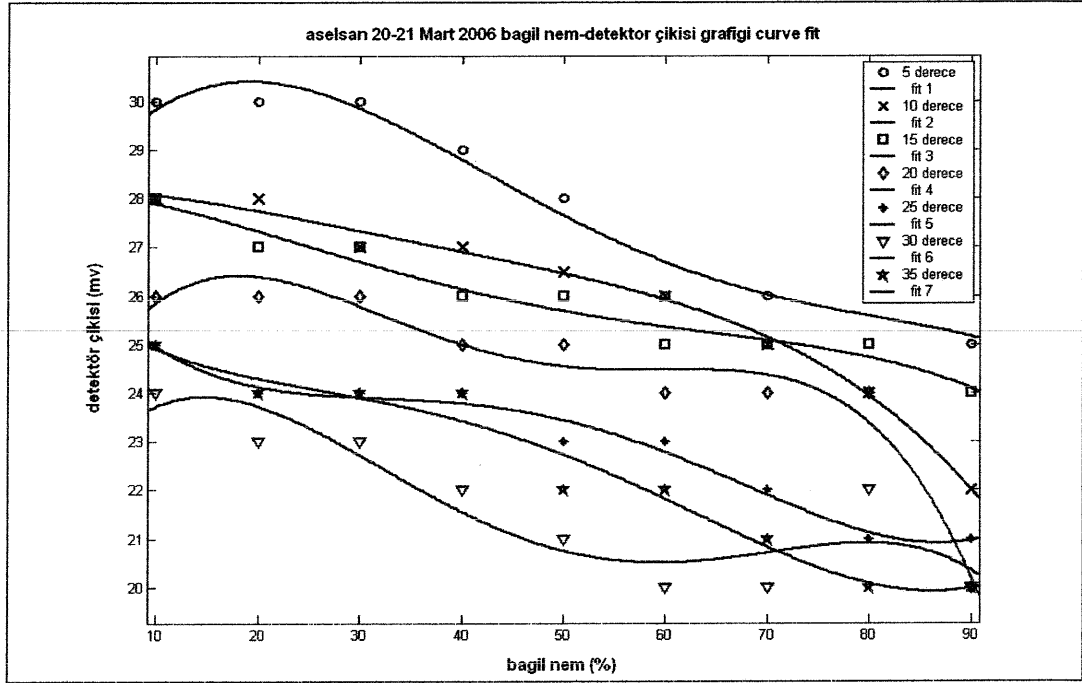


Şekil 5.9. Aselsan A.Ş.'nde kullanılan deney düzenineğin bağlantı şeması

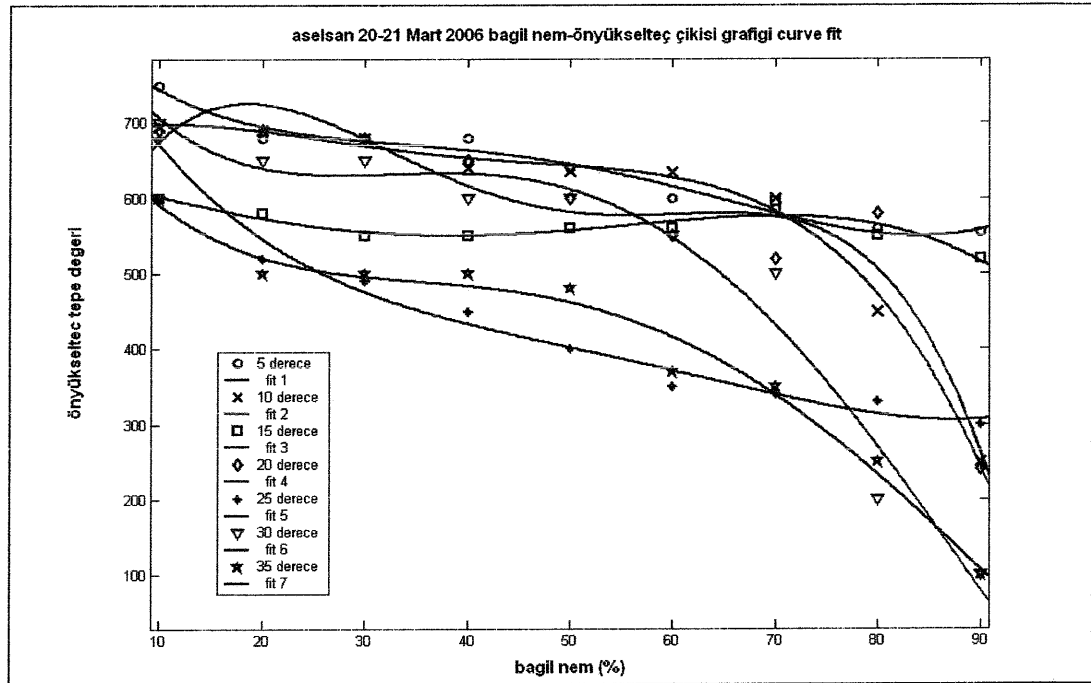


Resim 5.3. Aselsan A.Ş.'nde yapılan deney için kurulan düzenek

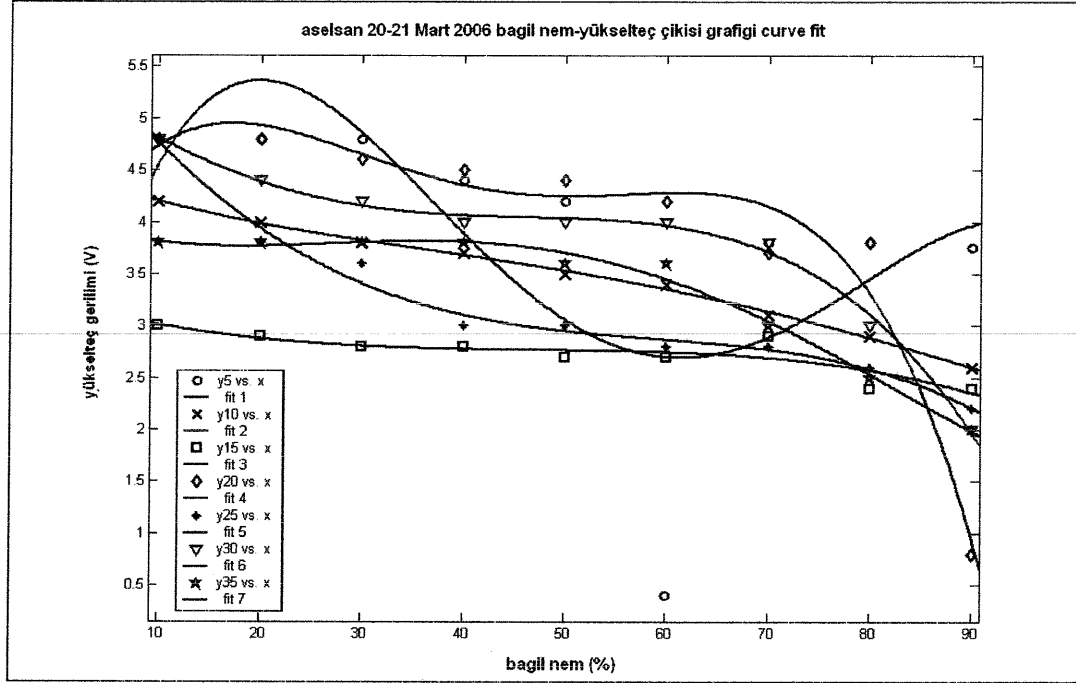
geriliminin azaldığı görülmektedir. Elde edilen bu sonuçların daha önce EOSBM.Md.lüğünde elde edilen değerlere benzer olduğu görülmektedir. Şekil 5.11. ve Şekil 5.12 incelendiğinde, 5–15 ° C sıcaklık değerleri için sıcaklık arttıkça önyükselteç ve yükselteç çıkış gerilimlerinin azaldığı görülmektedir. Ancak, 20° C sıcaklıktan sonra çıkış gerilimlerinde düzenli bir azalış olmadığı tespit edilmiştir. Gece görüş cihazının içinde bulunan elektronik eleman ve kartları dış etkenlere karşı korumak amacıyla yapılan dış korumasının çıkartılması, sıcaklık ve nem yükselmesinin gece görüş cihazı içinde bulunan elektronik eleman ve kartları etkilediği görülmüştür. Bu sebeple, Aselsan A.Ş.'nde yapılan deneysel çalışmalarında sadece dedektör çıkışları daha fazla dikkate alınmıştır. Ancak, önyükselteç ve yükselteç çıkışları da burada sunulmuştur.



Şekil 5.10. Tüm sıcaklık değerleri için eğri uyumlama yapılmış bağıl nem – dedektör çıkış gerilim grafiği



Şekil 5.11. Tüm sıcaklık değerleri için eğri uyumlama yapılmış bağıl nem – önyükselteç çıkış gerilim grafiği



Şekil 5.12. Tüm sıcaklık değerleri için eğri uyumlama yapılmış bağıl nem – yükselteç çıkış gerilim grafiği

5.2.2. Aselsan A.Ş. ve EOSBM.Md.lüğünde yapılan deney sonuçlarının karşılaştırılması

Passman ve Larmore [16] tarafından yapılan ölçümler için elde edilen bağıl nem - atmosferik geçirgenlik grafiği olan Şekil 4.6. ile Aselsan A.Ş.'nde yapılan deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen bağıl nem – dedektör çıkış voltajı grafiği olan Şekil 5.10. karşılaştırıldığında sıcaklık ve nem değerleri arttığında atmosferik geçirgenliğin (ya da dedektör çıkış geriliminin) azaldığı görülmüştür. Şekil 4.6. ve Şekil 5.10.'dan elde edilen değerler karşılaştırılacak olursa; her iki durumda da sıcaklık 20 derecede sabit tutulur, bağıl nem %60 artırılırsa atmosferik geçirgenliğin literatürde %14,84, Aselsan A.Ş. ölçümlerinde ise % 21,83 azaldığı görülmektedir. Aynı şekilde bağıl nem % 40 değerinde sabit tutulur, sıcaklık 5 dereceden 35 dereceye arttırılırsa atmosferik geçirgenliğin literatürde %17,14, Aselsan A.Ş. ölçümlerinde ise %18,64 azaldığı görülmektedir.

EOSBM.Md.lüğü ile Passman ve Larmore tarafından yapılan çalışmanın 20 derece sıcaklıkta alınan değerler daha önce karşılaştırılmıştı. 20 derece sıcaklıkta Passman ve Larmore tarafından verilen değerler göz önüne alındığında, nem oranı % 30 bağıl nemden % 90 bağıl nem değerine çıkartıldığında, geçirgenlikte % 14,84'lük bir azalma olduğu bulunmuştu. Aynı şekilde EOSBM.Md.lüğünde elde edilen sonuçlarda % 13,26'lık bir azalma görülmüştü. Aselsan A.Ş.'nde yapılan deneysel çalışmada 20 derece sıcaklıkta, bağıl nem oranı % 60 artırıldığında dedektör çıkış voltajında % 21,83'lük bir azalma olduğu görülmektedir. Azalma yüzdesinin literatürde ve EOSBM.Md.lüğündeki değerlerden fazla olmasının sebebi, gece görüş cihazı dış koruma kılıfının çıkartılmış olması ya da osiloskop ölçümlerindeki hassasiyetin çok iyi olmamasına bağlanmıştır.

Sonuç olarak, gece görüş cihazlarında, ortamın sıcaklık ve bağıl nem değerlerinin herhangi birinin ya da her ikisinin artışı atmosferik geçirgenlikte azalmaya sebep olmuştur ve gece görüş cihazının performansını düşürdüğü tespit edilmiştir.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Termal kamera dedektörlerinin performansını etkileyen 6 faktör vardır. Bunlar, kaynak, arka plan, atmosfer, optik sistem, dedektör ve sinyal işlemedir. Bu çalışmada, bunlardan birisi olan atmosferik geçirgenliğin etkisi incelenmiştir. Bu kapsamda, öncelikle gece görüş için görüntüleme sistemlerin tarihsel gelişimi hakkında bilgi verilmiştir. Arkasından kızılötesi termal görüntüleme sistemleri anlatılmıştır. Öncelikle kızılötesi ışınım ve atmosferik geçirgenlik konularında bilgi verilmiştir. Termal Radyasyon Kanunları kısaca anlatılmış ve kızılötesi dedektörler konusunda bilgi sunulmuştur.

Atmosferin yapısı, atmosferde bulunan gazların yaptığı emilim, kırılım ve saçılım mekanizmaları konusunda kısa bilgi verilmiş ve atmosferik geçirgenlik pencerelerinde gazların (su buharının) etkileri literatürden özetlenmiştir.

Termal kamera performansını atmosferde bulunan gazların yaptığı emilim, kırılım ve saçılım mekanizmalarının etkilediği görülmüştür. Bu gazların optik spektrumda etkileri incelendiğinde, çeşitli dağa boylarında geçirgenliğin daha fazla olduğu görülmektedir. Atmosferik geçirgenliğin daha yüksek olduğu bu bölgelerde atmosferik geçirgenlik pencereleri oluşmaktadır. Geçirgenliğin en fazla olduğu iki bölge 3–5 μm ve 8–12 μm aralıklarıdır. Bu sebeple, termal kameralardan daha net görüntü elde edebilmek amacıyla dedektör tasarımları bu aralıklarda çalışacak şekilde üretilmektedir.

Literatürde geçirgenliğin en fazla olduğu atmosferik pencerelerde gaz mekanizmaları incelenmiş ve geçirgenliği en çok su buharı ve karbon dioksitin etkilediği görülmüştür. Bu sebeple, bu çalışmada bu gazların etkileri incelenmiştir. Diğer gazların, argon, azot, helyum gazlarının etkileri de incelenmiş ancak su buharı hariç diğer gazların geçirgenliği etkilemediği görülmüştür.

Bu çalışmada, su buharının atmosferik geçirgenliğe etkisi deneysel olarak detaylı bir şekilde incelenmiştir. 8–12 µm dalga boyunda çalışan TOW gece görüş cihazı AN/TAS-4A ile Elektro-Optik Sistemler Bakım Merkezi Müdürlüğünde helyum, argon, azot ve su buharı kullanılarak deneyler yapılmıştır.

Deneysel çalışmalar sonucunda helyum, argon ve azot gazlarının atmosferik geçirgenliği etkilemediği, ancak, su buharının atmosferik geçirgenliği etkilediği tespit edilmiştir.

Su buharının etkisinin daha kontrollü olarak incelenebilmesi için deneyin Aselsan A.Ş. Macunköy tesislerinde bulunan iklimlendirme kabiniinde tekrarlanmasına karar verilmiştir.

Deney öncesinde, 5–35 °C arası sıcaklık aralığında her 5 °C sıcaklıkta ortamın bağıl nem değeri % 10'dan % 90'a kadar artırılarak daha önce Passman ve Larmore tarafından tespit edilen laboratuvar verilerine dayanılarak atmosferik geçirgenlik incelenmiştir.

Aselsan A.Ş.'nde yapılan deney çalışmalarda 5° C, 10° C, 15° C, 20° C, 25° C, 30° C ve 35° C sıcaklık değerlerinin her biri için bağıl nem oranı % 10'dan % 90'a kadar değiştirilmiştir. Her bir sıcaklık ve nem için dedektör çıkış voltajı, önyükselteç çıkış voltajı ve yükselteç çıkış voltajı, iki osiloskop vasıtasıyla ölçülmüştür. Deney sonuçları, literatürde bulunan sonuçlarla karşılaştırılmış ve sonuçların birbiri ile uyumlu olduğu görülmüştür. Ancak, gerek ölçümler sırasında gece görüş cihazının koruyucu kılıfının çıkarılması, gerekse osiloskop üzerinde voltaj değerleri okunurken çok hassas okunamaması sebebiyle arzu edilen sonuçlara tam olarak ulaşılamamıştır. Gene de Passman ve Larmore tarafından yapılan ölçümler için elde edilen atmosferik geçirgenlik değerleri ile Aselsan A.Ş.'nde iklimlendirme kabini ile yapılan deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen atmosferik geçirgenlik değerleri karşılaştırıldığında sıcaklık ve nem değerleri arttığında atmosferik

geçirgenliğin (ya da dedektör çıkış geriliminin) azaldığı görülmüştür. Her iki durumdan da elde edilen değerler karşılaştırılacak olursa; her iki durumda da sıcaklık sabit tutulur, bağıl nem artırılırsa atmosferik geçirgenliğin azaldığı görülmektedir. Aynı şekilde sabit bir bağıl nem değerinde, sıcaklık arttıkça atmosferik geçirgenlik azalmaktadır.

Sonuç olarak, sıcaklık ve bağıl nem değerlerinin herhangi birinin ya da her ikisinin artışı atmosferik geçirgenlikte azalmaya sebep olmaktadır.

Daha önce diğer araştırmacılar tarafından yapılan çalışmalar ile gerek EOSBM.Md.lüğünde gerekse Aselsan A.Ş.'nde yapılan deneysel çalışmaları sonucunda, ortamın atmosferik koşullarının, 8-12 µm dalga boyu aralığında çalışan termal kameraların görüntüsünü etkilediği sonucuna varılmıştır.

Termal gece görüş cihazları Türkiye'de genellikle Türk Silahlı Kuvvetleri ile Emniyet Genel Md.lüğü tarafından gece koşullarında güvenliği sağlamak ve muharebe etmek amacıyla kullanılmaktadır. Bu sebeple daima faal durumda bulunmaları ve performanslarının daima iyi olması gerekmektedir. Termal kamera kullanıcıları arasında, termal kamera performansının sadece dedektör ve/veya optik aksama bağlı olduğu bilinmektedir. Ancak bu tez çalışmasında termal kamera performansını etkileyen en önemli faktörlerden birinin de atmosferik koşullar olduğu ortaya konulmuştur.

Termal gece görüş kameralarını kullanan personelin bilgilendirilmesi amacıyla, tez çalışması sonucunda ulaşılan bu sonucun bir teknik bülten formatında hazırlanarak kullanıcılara gönderilmesi planlanmaktadır.

Bu çalışma sonucunda, termal gece görüş cihazı kullanıcılarının bilgilendirilmesi ve termal gece görüş cihazlarının performansının sıcak ve nemli havalarda büyük oranda azaldığını dikkate almaları sağlanacaktır.

Atmosferik koşulların performansa olan etkisinin azaltılması için termal kameralarda herhangi bir iyileştirmenin yapılmasının günümüz teknolojisi ile mümkün olmadığı düşünölmektedir. Ancak son yıllarda termal kamera dedektörlerinde yapılan gelişmeler göz önüne alındığında, değişik dalga boylarında çalışabilen çok kanallı dedektörlerin kullanılmaya başlanmasının atmosferik koşulların termal kamera performansına olan etkisini azaltacağı öngörülmektedir.

KAYNAKLAR

1. Biberman, L.M. and Sendall, R.L., "Introduction : A Brief History of Imaging Devices for Night Vision" , Electro-Optical Imaging: System Performance and Modeling 1st ed., Biberman, L.M., *The International Society for Optical Engineering*, Washington, 1-3 (2000).
2. Boyle, W.S., Smith, G.E., "Charge-coupled Semiconductor Devices", *Bell Syst.Tech.Journal*, 49: 587-593 (1970).
3. Shepherd, F., Yang, A., "Silicon Schottky Retinas For Infrared Imaging", *IEDM Technology Digest*, 19: 310–313 (1973).
4. Lawson, W.D., Nielson, S., Putley, E.H., Young, A.S., "Preparation and Properties of HgTe and Mixed Crystals of HgTe-CdTe", *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 9 (3-4): 325–329 (1959).
5. Kruse, P.W., Blue, M.D., Garfunkel, J.H., Saur, W.D., "Long Wavelength Photoeffects In Mercury Selenide, Mercury Telluride and Mercury Telluride-Cadmium Telluride", *Infrared Physics*, 2: 53–60 (1962).
6. Beşikci, C., "Milli Termal Dedektör Geliştirme Çalışmaları", *1 nci Optik, Elektro-Optik Semineri*, Ankara, 71-80 (2006).
7. Koçer, H., "Kızılötesi Dedektör Teknolojileri", *EOSBM.Md.lüğü*, Ankara, 2-4 (2005).
8. Hecht, E., "Optics 3rd ed.", *Addison-Wesley*, Massachusetts, 18-23 (1998).
9. Weichel, H., "Laser Beam Propagation In The Atmosphere", *The International Society for Optical Engineering*, 3: 12 (1990).
10. Riedl, M.J., "Optical Design Fundamentals for Infrared Systems 2nd ed.", *The International Society for Optical Engineering*, Washington, 4, 6-9, 11, 19 (2001).
11. Von Krbek, F., "Erlebte Physik 1st ed.", *Deutscher Verlag*, Berlin, 119 (1942).
12. Herman, B., LaRocca A.J., Turner R.E., "Atmospheric Transmission", The Infrared Handbook, 2nd ed., W.L.Wolfe and G.J.Zissis, *Environmental Research Institute of Michigan*, Michigan, 87 (1985).

13. Thomas, M.E., Duncan, D.D., "Atmospheric Transmission", Atmospheric Propagation of Radiation, 2, Smith, F.G., ***Infrared Information Analysis Center and SPIE Optical Engineering Press***, Michigan, 2, 7, 11, 39 (1993).
14. Lide D.R., "CRC Handbook of Chemistry and Physics 72 nd ed.", ***CRC Pres***, Boca Raton, 91 (1991).
15. Marquis M., "Thermal Imaging Systems Theory Rev A", ***Texas Instruments Incorporated Defence Systems & Electronics***, Texas, 8-11 (1996).
16. Passman, S., Larmore, L.; "Atmospheric Transmission 2nd ed.", ***The Rand Corporation***, Santa Monica, California, 897 (1956).
17. Hudson, R.D., "Infrared System Engineering", Stanley S. Ballard, ***John Wiley & Sons, Inc.***, Florida, 119,121 (1969).
18. TOW-T24D, TOW Weapon System Characteristics Document, Revision D, ***Hughes Aircraft Company***, Tucson, 29-30 (1993).
19. TM 9-5855-450-24, Organizational Direct Support and General Support Maintenance Manual For Night Vision Sight, Infrared AN/TAS-4A, ***Department Of The Army***, Washington, 1-31 (1987).
20. TM 11-5855-255-14&P, Operator's, Organizational, Direct Support and General Support Maintenance Manual Including Repair Parts and Special Tools Lists For Test Set, Night Vision Sight AN/TAM-3A, ***Department Of The Army***, Washington, 1-3 (1979).

EKLER

EK-1 7,0 µm–13,9 µm dalga boyunda su buharı miktarının çökelti su kalınlığına bağlı olarak atmosferik geçirgenliğe etkisi

Dalga Boyu (µ)	Su Buharı Miktarı (Çökelti Su Milimetre)												
	0,2	0,5	1	2	5	10	20	50	100	200			
7,0	0,569	0,245	0,060	0,004	0	0	0	0	0	0	0	0	
7,1	0,716	0,433	0,188	0,035	0	0	0	0	0	0	0	0	
7,2	0,782	0,540	0,292	0,085	0,002	0	0	0	0	0	0	0	
7,3	0,849	0,664	0,441	0,194	0,017	0	0	0	0	0	0	0	
7,4	0,922	0,817	0,666	0,444	0,132	0,018	0	0	0	0	0	0	
7,5	0,947	0,874	0,762	0,582	0,258	0,066	0	0	0	0	0	0	
7,6	0,922	0,817	0,666	0,444	0,132	0,018	0	0	0	0	0	0	
7,7	0,978	0,944	0,884	0,796	0,564	0,328	0,102	0,003	0	0	0	0	
7,8	0,974	0,937	0,878	0,771	0,523	0,273	0,074	0,002	0	0	0	0	
7,9	0,982	0,959	0,920	0,842	0,658	0,433	0,187	0,015	0	0	0	0	
8,0	0,990	0,975	0,951	0,904	0,777	0,603	0,365	0,080	0,006	0	0	0	
8,1	0,994	0,986	0,972	0,945	0,869	0,754	0,568	0,244	0,059	0,003	0	0	
8,2	0,993	0,982	0,964	0,930	0,834	0,696	0,484	0,163	0,027	0	0	0	
8,3	0,995	0,988	0,976	0,953	0,887	0,786	0,618	0,300	0,090	0,008	0	0	
8,4	0,995	0,987	0,975	0,950	0,880	0,774	0,599	0,278	0,077	0,006	0	0	
8,5	0,994	0,986	0,972	0,944	0,866	0,750	0,562	0,237	0,056	0,003	0	0	
8,6	0,996	0,992	0,982	0,965	0,915	0,837	0,702	0,411	0,169	0,029	0	0	
8,7	0,996	0,992	0,983	0,966	0,916	0,839	0,704	0,416	0,173	0,030	0	0	
8,8	0,997	0,993	0,983	0,966	0,917	0,841	0,707	0,421	0,177	0,031	0	0	
8,9	0,997	0,992	0,983	0,966	0,918	0,843	0,709	0,425	0,180	0,032	0	0	
9,0	0,997	0,992	0,984	0,968	0,921	0,848	0,719	0,440	0,193	0,037	0	0	
9,1	0,997	0,992	0,985	0,970	0,926	0,858	0,735	0,464	0,215	0,046	0	0	
9,2	0,997	0,993	0,985	0,971	0,929	0,863	0,744	0,478	0,228	0,052	0	0	
9,3	0,997	0,993	0,986	0,972	0,930	0,867	0,750	0,489	0,239	0,057	0	0	
9,4	0,997	0,993	0,986	0,973	0,933	0,870	0,756	0,498	0,248	0,061	0	0	

EK-1 (Devam) 7,0 μm –13,9 μm dalga boyunda su buharı miktarının çökelti su kalınlığına bağlı olarak atmosferik geçirgenliğe etkisi

Dalga Boyu (μ)	Su Buharı Miktarı (Çökelti Su Milimetre)												
	0,2	0,5	1	2	5	10	20	50	100	200			
9,5	0,997	0,993	0,987	0,973	0,934	0,873	0,762	0,507	0,257	0,066			
9,6	0,997	0,993	0,987	0,974	0,936	0,876	0,766	0,516	0,265	0,070			
9,7	0,997	0,993	0,987	0,974	0,937	0,878	0,770	0,521	0,270	0,073			
9,8	0,997	0,994	0,987	0,975	0,938	0,880	0,773	0,526	0,277	0,077			
9,9	0,997	0,994	0,987	0,975	0,939	0,882	0,777	0,532	0,283	0,080			
10,0	0,998	0,994	0,988	0,975	0,940	0,883	0,780	0,538	0,289	0,083			
10,1	0,998	0,994	0,988	0,975	0,940	0,883	0,780	0,538	0,289	0,083			
10,2	0,998	0,994	0,988	0,975	0,940	0,883	0,780	0,538	0,289	0,083			
10,3	0,998	0,994	0,988	0,976	0,940	0,884	0,781	0,540	0,292	0,085			
10,4	0,998	0,994	0,988	0,976	0,941	0,885	0,782	0,542	0,294	0,086			
10,5	0,998	0,994	0,988	0,976	0,941	0,886	0,784	0,544	0,295	0,087			
10,6	0,998	0,994	0,988	0,976	0,942	0,887	0,786	0,548	0,300	0,089			
10,7	0,998	0,994	0,988	0,976	0,942	0,887	0,787	0,550	0,302	0,091			
10,8	0,998	0,994	0,988	0,976	0,941	0,886	0,784	0,544	0,295	0,087			
10,9	0,998	0,994	0,988	0,976	0,940	0,884	0,781	0,540	0,292	0,085			
11,0	0,998	0,994	0,988	0,975	0,940	0,883	0,779	0,536	0,287	0,082			
11,1	0,997	0,994	0,987	0,975	0,939	0,882	0,777	0,532	0,283	0,080			
11,2	0,997	0,993	0,986	0,972	0,931	0,867	0,750	0,487	0,237	0,056			
11,3	0,997	0,992	0,985	0,970	0,927	0,859	0,738	0,467	0,218	0,048			
11,4	0,997	0,993	0,986	0,971	0,930	0,865	0,748	0,485	0,235	0,055			
11,5	0,997	0,993	0,986	0,972	0,932	0,868	0,753	0,493	0,243	0,059			
11,6	0,997	0,993	0,987	0,974	0,935	0,875	0,765	0,513	0,262	0,069			
11,7	0,996	0,990	0,980	0,961	0,906	0,820	0,673	0,372	0,138	0,019			
11,8	0,997	0,992	0,982	0,969	0,925	0,863	0,733	0,460	0,212	0,045			
11,9	0,997	0,993	0,986	0,972	0,932	0,869	0,755	0,495	0,245	0,060			

EK-1 (Devam) 7,0 µm–13,9 µm dalga boyunda su buharı miktarının çökelti su kalınlığına bağlı olarak atmosferik geçirgenliğe etkisi

Dalga Boyu (µ)	Su Buharı Miktarı (Çökelti Su Milimetre)										
	0,2	0,5	1	2	5	10	20	50	100	200	
12,0	0,997	0,993	0,987	0,974	0,937	0,878	0,770	0,521	0,270	0,073	
12,1	0,997	0,994	0,987	0,975	0,938	0,880	0,773	0,526	0,277	0,077	
12,2	0,997	0,994	0,987	0,975	0,938	0,880	0,775	0,528	0,279	0,078	
12,3	0,997	0,993	0,987	0,974	0,937	0,878	0,770	0,521	0,270	0,073	
12,4	0,997	0,993	0,987	0,974	0,935	0,874	0,764	0,511	0,261	0,068	
12,5	0,997	0,993	0,986	0,973	0,933	0,871	0,759	0,502	0,252	0,063	
12,6	0,997	0,993	0,986	0,972	0,931	0,868	0,752	0,491	0,241	0,058	
12,7	0,997	0,993	0,985	0,971	0,929	0,863	0,744	0,478	0,228	0,052	
12,8	0,997	0,992	0,985	0,970	0,926	0,858	0,736	0,466	0,217	0,047	
12,9	0,997	0,992	0,984	0,969	0,924	0,853	0,728	0,452	0,204	0,041	
13,0	0,997	0,992	0,984	0,967	0,921	0,846	0,718	0,437	0,191	0,036	
13,1	0,996	0,991	0,983	0,966	0,918	0,843	0,709	0,424	0,180	0,032	
13,2	0,996	0,991	0,982	0,965	0,915	0,837	0,701	0,411	0,169	0,028	
13,3	0,996	0,991	0,982	0,964	0,912	0,831	0,690	0,397	0,153	0,025	
13,4	0,996	0,990	0,981	0,962	0,908	0,825	0,681	0,382	0,146	0,021	
13,5	0,996	0,990	0,980	0,961	0,905	0,819	0,670	0,368	0,136	0,019	
13,6	0,996	0,990	0,979	0,959	0,902	0,813	0,661	0,355	0,126	0,016	
13,7	0,996	0,989	0,979	0,958	0,898	0,807	0,651	0,342	0,117	0,014	
13,8	0,996	0,989	0,978	0,956	0,894	0,800	0,640	0,328	0,107	0,011	
13,9	0,995	0,988	0,977	0,955	0,891	0,793	0,629	0,313	0,098	0,010	

EK-2 7,0 μm –13,9 μm dalga boyunda karbon dioksitin yol uzunluğuna bağlı olarak atmosferik geçirgenliğe etkisi

Dalga Boyu (μ)	Yol Uzunluğu (kilometre)									
	0,2	0,5	1	2	5	10	20	50	100	200
7,0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
7,1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
7,2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
7,3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
7,4	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
7,5	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
7,6	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
7,7	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
7,8	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
7,9	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
8,0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
8,1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
8,2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
8,3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
8,4	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
8,5	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
8,6	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
8,7	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
8,8	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
8,9	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
9,0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
9,1	1	1	0,999	0,999	0,998	0,995	0,991	0,978	0,955	0,914
9,2	1	1	0,999	0,998	0,995	0,991	0,982	0,955	0,913	0,834
9,3	0,999	0,997	0,995	0,990	0,975	0,951	0,904	0,776	0,605	0,363
9,4	0,993	0,982	0,965	0,931	0,837	0,700	0,491	0,168	0,028	0,001

EK-2 (Devam) 7,0 µm–13,9 µm dalga boyunda karbon dioksitin yol uzunluğuna bağlı olarak atmosferik geçirgenliğe etkisi

Dalga Boyu (µ)	Yol Uzunluğu (kilometre)												
	0,2	0,5	1	2	5	10	20	50	100	200			
9,5	0,993	0,983	0,967	0,935	0,842	0,715	0,512	0,187	0,035	0,001			
9,6	0,996	0,990	0,980	0,961	0,906	0,821	0,675	0,363	0,140	0,029			
9,7	0,995	0,986	0,973	0,947	0,873	0,761	0,580	0,256	0,065	0,004			
9,8	0,997	0,992	0,984	0,969	0,924	0,858	0,730	0,455	0,206	0,043			
9,9	0,998	0,995	0,989	0,979	0,948	0,897	0,811	0,585	0,342	0,123			
10,0	1	1	0,999	0,997	0,994	0,989	0,978	0,945	0,892	0,797			
10,1	1	0,999	0,998	0,996	0,990	0,980	0,960	0,902	0,814	0,663			
10,2	0,997	0,994	0,998	0,977	0,943	0,900	0,792	0,558	0,312	0,097			
10,3	0,997	0,994	0,987	0,975	0,939	0,881	0,777	0,532	0,283	0,080			
10,4	1	1	0,999	0,998	0,995	0,991	0,982	0,955	0,913	0,834			
10,5	1	1	0,999	0,998	0,998	0,995	0,991	0,978	0,955	0,914			
10,6	1	1	0,999	0,999	0,998	0,995	0,991	0,978	0,955	0,914			
10,7	1	1	1	0,999	0,999	0,997	0,995	0,986	0,973	0,947			
10,8	1	1	0,999	0,998	0,998	0,995	0,991	0,978	0,955	0,914			
10,9	1	0,999	0,999	0,997	0,983	0,986	0,973	0,934	0,872	0,761			
11,0	1	0,999	0,999	0,997	0,993	0,986	0,973	0,934	0,872	0,761			
11,1	1	0,999	0,998	0,997	0,992	0,984	0,969	0,923	0,855	0,726			
11,2	1	0,999	0,998	0,995	0,989	0,978	0,955	0,892	0,796	0,633			
11,3	0,999	0,999	0,997	0,994	0,985	0,971	0,942	0,862	0,742	0,552			
11,4	0,999	0,998	0,997	0,993	0,983	0,966	0,934	0,842	0,709	0,503			
11,5	0,999	0,998	0,996	0,992	0,980	0,960	0,921	0,814	0,661	0,438			
11,6	0,999	0,998	0,995	0,991	0,977	0,955	0,912	0,794	0,632	0,399			
11,7	0,999	0,998	0,995	0,991	0,977	0,955	0,912	0,794	0,632	0,399			
11,8	0,999	0,998	0,997	0,993	0,983	0,966	0,934	0,842	0,709	0,503			
11,9	1	0,999	0,998	0,995	0,989	0,978	0,955	0,892	0,796	0,633			

EK-2 (Devam) 7,0 µm–13,9 µm dalga boyunda karbon dioksitin yol uzunluğuna bağlı olarak atmosferik geçirgenliğe etkisi

Dalga Boyu (µ)	Yol Uzunluğu (kilometre)									
	0,2	0,5	1	2	5	10	20	50	100	200
12,0	1	1	0,999	0,999	0,997	0,993	0,986	0,966	0,934	0,872
12,1	1	1	0,999	0,998	0,998	0,995	0,991	0,978	0,955	0,914
12,2	1	1	0,999	0,998	0,998	0,995	0,991	0,978	0,955	0,914
12,3	0,998	0,995	0,990	0,981	0,952	0,907	0,823	0,614	0,376	0,142
12,4	0,994	0,985	0,970	0,941	0,859	0,738	0,545	0,218	0,048	0,002
12,5	0,987	0,968	0,936	0,877	0,719	0,517	0,268	0,037	0,001	0
12,6	0,980	0,950	0,903	0,815	0,599	0,358	0,129	0,006	0	0
12,7	0,996	0,989	0,979	0,959	0,899	0,809	0,654	0,346	0,120	0,015
12,8	0,990	0,974	0,949	0,901	0,770	0,592	0,351	0,072	0,005	0
12,9	0,985	0,962	0,925	0,856	0,677	0,458	0,210	0,020	0	0
13,0	0,991	0,977	0,955	0,912	0,794	0,630	0,397	0,099	0,010	0
13,1	0,990	0,974	0,949	0,900	0,768	0,592	0,348	0,071	0,005	0
13,2	0,978	0,946	0,895	0,801	0,575	0,330	0,109	0,004	0	0
13,3	0,952	0,884	0,782	0,611	0,292	0,085	0,007	0	0	0
13,4	0,935	0,846	0,715	0,512	0,187	0,035	0,001	0	0	0
13,5	0,901	0,767	0,593	0,352	0,070	0,005	0	0	0	0
13,6	0,901	0,792	0,627	0,351	0,097	0,009	0	0	0	0
13,7	0,916	0,803	0,644	0,415	0,110	0,012	0	0	0	0
13,8	0,858	0,681	0,464	0,215	0,021	0	0	0	0	0
13,9	0,778	0,534	0,286	0,082	0,002	0	0	0	0	0

EK-3 5-35° C sıcaklıkta bağıl neme bağlı olarak atmosferik geçirgenliğin değişim çizelgeleri

Çizelge 3.1. 5° C sıcaklıkta bağıl neme bağlı olarak atmosferik geçirgenliğin değişim çizelgesi

Bağıl Nem (%)	Mutlak Nem (g,m ⁻³)	Çökelti Su (mm,km ⁻¹)	Atmosferik Geçirgenlik
10	0,8	1,2	0,9778
20	1,2	1,5	0,9732
30	2	2,3	0,9613
40	2,8	3	0,9510
50	3,3	3,5	0,9437
60	4	4,2	0,9336
70	4,8	4,9	0,9236
80	5,5	5,8	0,9108
90	5,9	6,2	0,9052

Çizelge 3.2. 10° C sıcaklıkta bağıl neme bağlı olarak atmosferik geçirgenliğin değişim çizelgesi

Bağıl Nem (%)	Mutlak Nem (g,m ⁻³)	Çökelti Su (mm,km ⁻¹)	Atmosferik Geçirgenlik
10	1,1	1,4	0,9747
20	1,4	1,7	0,9702
30	3,2	3,4	0,9452
40	4	4,2	0,9336
50	5	5	0,9221
60	5,8	5,9	0,9094
70	6,7	7	0,8942
80	7,8	7,9	0,8818
90	8,3	8,8	0,8697

Çizelge 3.3. 15° C sıcaklıkta bağıl neme bağlı olarak atmosferik geçirgenliğin değişim çizelgesi

Bağıl Nem (%)	Mutlak Nem (g,m ⁻³)	Çökelti Su (mm,km ⁻¹)	Atmosferik Geçirgenlik
10	1,7	1,9	0,9673
20	2,6	2,7	0,9554
30	3,9	4	0,9365
40	5,1	5,5	0,9151
50	6,4	6,8	0,8969
60	7,8	7,9	0,8818
70	9	9	0,8670
80	10,2	10,5	0,8472
90	11,4	11,6	0,8330

EK-3 (Devam) 5-35° C sıcaklıkta bağıl neme bağlı olarak atmosferik geçirgenliğin değişim çizelgeleri

Çizelge 3.4. 20° C sıcaklıkta bağıl neme bağlı olarak atmosferik geçirgenliğin değişim çizelgesi

Bağıl Nem (%)	Mutlak Nem (g,m ⁻³)	Çökelti Su (mm,km ⁻¹)	Atmosferik Geçirgenlik
10	2	2,3	0,9613
20	3,5	3,8	0,9394
30	5,2	5,5	0,9151
40	7	7,2	0,8914
50	8,4	8,8	0,8697
60	10,3	10,5	0,8472
70	12	12,3	0,8240
80	13,8	13,9	0,8040
90	15,3	15,9	0,7796

Çizelge 3.5. 25° C sıcaklıkta bağıl neme bağlı olarak atmosferik geçirgenliğin değişim çizelgesi

Bağıl Nem (%)	Mutlak Nem (g,m ⁻³)	Çökelti Su (mm,km ⁻¹)	Atmosferik Geçirgenlik
10	2,2	2,4	0,9598
20	4,8	4,9	0,9236
30	7	7,2	0,8914
40	9,1	9,3	0,8630
50	11,2	11,5	0,8342
60	13,7	13,8	0,8052
70	16	16,2	0,7760
80	18,2	18,6	0,7478
90	20,6	21	0,7206

Çizelge 3.6. 30° C sıcaklıkta bağıl neme bağlı olarak atmosferik geçirgenliğin değişim çizelgesi

Bağıl Nem (%)	Mutlak Nem (g,m ⁻³)	Çökelti Su (mm,km ⁻¹)	Atmosferik Geçirgenlik
10	3,2	3,4	0,9452
20	6,1	6,3	0,9039
30	9,2	9,4	0,8617
40	12,2	12,4	0,8228
50	15	15,3	0,7868
60	18	18,2	0,7524
70	21,1	21,2	0,7184
80	24	24,1	0,6870
90	26,9	26,8	0,6590

EK-3 (Devam) 5-35° C sıcaklıkta bağıl neme bağlı olarak atmosferik geçirgenliğin değişim çizelgeleri

Çizelge 3.7. 35° C sıcaklıkta bağıl neme bağlı olarak atmosferik geçirgenliğin değişim çizelgesi

Bağıl Nem (%)	Mutlak Nem (g,m ⁻³)	Çökelti Su (mm,km ⁻¹)	Atmosferik Geçirgenlik
10	4,1	4,4	0,9307
20	7,7	7,9	0,8818
30	11,9	12	0,8278
40	15,8	16	0,7784
50	19,2	19,2	0,7409
60	23,3	23,3	0,6955
70	27,4	27,4	0,6530
80	31,4	31,4	0,6139
90	35	35	0,5808

EK-4 Aselsan A.Ş.'nde yapılan deney çalışması sonucunda ölçülen değerler

Çizelge 4.1. 5° C sıcaklık için çeşitli nem değerleri için çıkış gerilimleri

Ölçüm Tarihi ve Saati	Bağıl Nem (%)	Dedektör Gerilimi (mV)	Önyükselteç Gerilimi (mV)	Yükselteç Gerilimi (V)
20 / 03 / 2006 12:05	10	30	750	4,8
20 / 03 / 2006 12:20	20	30	680	4,8
20 / 03 / 2006 12:55	30	30	680	4,8
20 / 03 / 2006 13:07	40	29	680	4,4
20 / 03 / 2006 13:16	50	28	640	4,2
20 / 03 / 2006 13:26	60	26	600	4,0
20 / 03 / 2006 13:34	70	26	585	3,8
20 / 03 / 2006 13:40	80	26	560	3,8
20 / 03 / 2006 13:45	90	25	555	3,75

Çizelge 4.2. 10° C sıcaklık için çeşitli nem değerleri için çıkış gerilimleri

Ölçüm Tarihi ve Saati	Bağıl Nem (%)	Dedektör Gerilimi (mV)	Önyükselteç Gerilimi (mV)	Yükselteç Gerilimi (V)
20 / 03 / 2006 15:35	10	28	695	4,2
20 / 03 / 2006 15:22	20	28	690	4,0
20 / 03 / 2006 15:05	30	27	680	3,8
20 / 03 / 2006 14:55	40	27	640	3,7
20 / 03 / 2006 14:41	50	26,5	636	3,5
20 / 03 / 2006 14:25	60	26	635	3,4
20 / 03 / 2006 14:17	70	25	600	3,1
20 / 03 / 2006 14:07	80	24	450	2,9
20 / 03 / 2006 13:55	90	22	250	2,6

Çizelge 4.3. 15° C sıcaklık için çeşitli nem değerleri için çıkış gerilimleri

Ölçüm Tarihi ve Saati	Bağıl Nem (%)	Dedektör Gerilimi (mV)	Önyükselteç Gerilimi (mV)	Yükselteç Gerilimi (V)
20 / 03 / 2006 15:52	10	28	600	3,0
20 / 03 / 2006 15:58	20	27	580	2,9
20 / 03 / 2006 16:04	30	27	550	2,8
20 / 03 / 2006 16:10	40	26	550	2,8
20 / 03 / 2006 16:19	50	26	560	2,7
20 / 03 / 2006 16:27	60	25	560	2,7
20 / 03 / 2006 16:31	70	25	595	2,9
20 / 03 / 2006 16:39	80	25	550	2,4
20 / 03 / 2006 16:43	90	24	520	2,4

EK-4 (Devam) Aselsan A.Ş.'nde yapılan deney çalışması sonucunda ölçülen değerler

Çizelge 4.4. 20° C sıcaklık için çeşitli nem değerleri için çıkış gerilimleri

Ölçüm Tarihi ve Saati	Bağıl Nem (%)	Dedektör Gerilimi (mV)	Önyükselteç Gerilimi (mV)	Yükselteç Gerilimi (V)
21 / 03 / 2006 10:05	10	26	690	4,8
21 / 03 / 2006 09:54	20	26	690	4,8
21 / 03 / 2006 09:35	30	26	680	4,6
21 / 03 / 2006 09:26	40	25	650	4,5
21 / 03 / 2006 09:18	50	25	600	4,4
21 / 03 / 2006 09:11	60	24	550	4,2
21 / 03 / 2006 09:02	70	24	520	3,7
21 / 03 / 2006 08:55	80	24	580	3,8
20 / 03 / 2006 16:51	90	20	240	0,8

Çizelge 4.5. 25° C sıcaklık için çeşitli nem değerleri için çıkış gerilimleri

Ölçüm Tarihi ve Saati	Bağıl Nem (%)	Dedektör Gerilimi (mV)	Önyükselteç Gerilimi (mV)	Yükselteç Gerilimi (V)
21 / 03 / 2006 10:11	10	25	680	4,8
21 / 03 / 2006 10:20	20	24	520	3,8
21 / 03 / 2006 10:31	30	24	490	3,6
21 / 03 / 2006 10:40	40	24	450	3,0
21 / 03 / 2006 10:49	50	23	400	3,0
21 / 03 / 2006 11:03	60	23	350	2,8
21 / 03 / 2006 11:08	70	22	340	2,8
21 / 03 / 2006 11:15	80	21	330	2,6
21 / 03 / 2006 11:21	90	21	300	2,2

Çizelge 4.6. 30° C sıcaklık için çeşitli nem değerleri için çıkış gerilimleri

Ölçüm Tarihi ve Saati	Bağıl Nem (%)	Dedektör Gerilimi (mV)	Önyükselteç Gerilimi (mV)	Yükselteç Gerilimi (V)
21 / 03 / 2006 12:58	10	24	700	4,8
21 / 03 / 2006 12:48	20	23	650	4,4
21 / 03 / 2006 12:35	30	23	650	4,2
21 / 03 / 2006 12:22	40	22	600	4,0
21 / 03 / 2006 12:13	50	21	600	4,0
21 / 03 / 2006 12:04	60	20	550	4,0
21 / 03 / 2006 11:59	70	20	500	3,8
21 / 03 / 2006 11:46	80	22	200	3,0
21 / 03 / 2006 11:28	90	20	100	2,0

EK-4 (Devam) Aselsan A.Ş.'nde yapılan deney çalışması sonucunda ölçülen değerler

Çizelge 4.7. 35° C sıcaklık için çeşitli nem değerleri için çıkış gerilimleri

Ölçüm Tarihi ve Saati	Bağıl Nem (%)	Dedektör Gerilimi (mV)	Önyükselteç Gerilimi (mV)	Yükselteç Gerilimi (V)
21 / 03 / 2006 13:08	10	25	600	3,8
21 / 03 / 2006 13:20	20	24	500	3,8
21 / 03 / 2006 13:34	30	24	500	3,8
21 / 03 / 2006 13:47	40	24	500	3,8
21 / 03 / 2006 13:53	50	22	480	3,6
21 / 03 / 2006 14:02	60	22	370	3,6
21 / 03 / 2006 14:13	70	21	350	3,0
21 / 03 / 2006 14:21	80	20	250	2,5
21 / 03 / 2006 14:34	90	20	100	2,0

EK-5 Aselsan A.Ş.'nde yapılan ölçüm sonuçlarına eğri uyumlaması yapıldığında elde edilen değerler

Çizelge 5.1. 5° C sıcaklıkta eğri uyumlaması yapıldığında elde edilen değerler

5 °C	Eşitlik	10	20	30	40	50	60	70	80	90
Dedektör Gerilimi	$Y=P1.X^4+P2.X^3+P3.X^2+P4.X+P5$ $P1=-6,702e-007$ $P2=0,0001652$ $P3=-0,01374$ $P4=0,3621$ $P5=27,44$ $R-square=0,9688$	29,8455	30,4004	29,8545	28,7971	27,6563	26,6994	26,0331	25,6030	25,1940
Ön Yükselteç Gerilimi	$Y=P1.X^4+P2.X^3+P3.X^2+P4.X+P5$ $P1=3,948e-005$ $P2=-0,007842$ $P3=0,525$ $P4=-15,84$ $P5=858,1$ $R-square=0,9747$	744,7528	694,8808	675,6448	663,6808	645,1000	615,4888	579,9088	552,8968	558,4648
Yükselteç Gerilimi	$Y=P1.X^4+P2.X^3+P3.X^2+P4.X+P5$ $P1=-1,253e-007$ $P2=3,255e-005$ $P3=-0,002754$ $P4=0,06908$ $P5=4,339$ $R-square=0,9892$	4,7857	4,8594	4,7102	4,4582	4,1936	3,9763	3,8362	3,7731	3,7568

EK-5 (Devam) Aselsan A.Ş.'nde yapılan ölçüm sonuçlarına eğri uyumlaması yapıldığında elde edilen değerler

Çizelge 5.2. 10° C sıcaklıkta eğri uyumlaması yapıldığında elde edilen değerler

10 °C	Eşitlik	10	20	30	40	50	60	70	80	90
Dedektör Gerilimi	$Y=P1.X^4+P2.X^3+P3.X^2+P4.X+P5$ $P1=-2,914e-007$ $P2=4,06e-005$ $P3=-0,002139$ $P4=0,007595$ $P5=28,17$ $R-square=0,9928$	28,0697	27,7445	27,3329	26,9038	26,4560	25,9184	25,1498	23,9395	22,0063
Ön Yükselteç Gerilimi	$Y=P1.X^4+P2.X^3+P3.X^2+P4.X+P5$ $P1=-5,44e-005$ $P2=0,007963$ $P3=-0,3995$ $P4=6,421$ $P5=665,2$ $R-square=0,993$	696,8790	688,8200	669,2170	653,2080	642,8750	627,2440	582,2850	470,9120	242,9830
Yükselteç Gerilimi	$Y=P1.X^4+P2.X^3+P3.X^2+P4.X+P5$ $P1=3,788e-008$ $P2=-1,002e-005$ $P3=0,0007942$ $P4=-0,03935$ $P5=4,528$ $R-square=0,9973$	4,2043	3,9846	3,8224	3,6804	3,5302	3,3527	3,1377	2,8842	2,6002

EK-5 (Devam) Aselsan A.Ş.'nde yapılan ölçüm sonuçlarına eğri uyumlaması yapıldığında elde edilen değerler

Çizelge 5.3. 15° C sıcaklıkta eğri uyumlaması yapıldığında elde edilen değerler

15 °C	Eşitlik	10	20	30	40	50	60	70	80	90
Dedektör Gerilimi	$Y=P1.X^4+P2.X^3+P3.X^2+P4.X+P5$ $P1=-2,622e-007$ $P2=4,656e-005$ $P3=-0,002435$ $P4=-0,0126$ $P5=28,22$ $R-square=0,9577$	27,8944	27,3245	26,6952	26,1286	25,6838	25,3568	25,0812	24,7270	24,1018
Ön Yükselteç Gerilimi	$Y=P1.X^4+P2.X^3+P3.X^2+P4.X+P5$ $P1=-1,675e-005$ $P2=0,002017$ $P3=-0,02323$ $P4=-3,367$ $P5=636,4$ $R-square=0,8515$	602,2565	573,2240	555,3745	550,7600	557,4125	569,3440	576,5465	564,9920	516,6325
Yükselteç Gerilimi	$Y=P1.X^4+P2.X^3+P3.X^2+P4.X+P5$ $P1=-8,741e-009$ $P2=-2,713e-006$ $P3=0,0005005$ $P4=-0,0264$ $P5=3,228$ $R-square=0,7705$	3,0112	2,8771	2,8061	2,7768	2,7655	2,7465	2,6920	2,5721	2,3548

EK-5 (Devam) Aselsan A.Ş.'nde yapılan ölçüm sonuçlarına eğri uyumlaması yapıldığında elde edilen değerler

Çizelge 5.4. 20° C sıcaklıkta eğri uyumlaması yapıldığında elde edilen değerler

20 °C	Eşitlik	10	20	30	40	50	60	70	80	90
Dedektör Gerilimi	$Y=P1.X^4+P2.X^3+P3.X^2+P4.X+P5$ $P1=-1,894e-006$ $P2=0,0003493$ $P3=-0,02191$ $P4=0,4941$ $P5=22,78$ $R-square=0,9574$	25,8604	26,3894	25,7810	24,9946	24,5350	24,4526	24,3430	23,3474	20,1524
Ön Yükselteç Gerilimi	$Y=P1.X^4+P2.X^3+P3.X^2+P4.X+P5$ $P1=0,000153$ $P2=0,02845$ $P3=-1,798$ $P4=41,19$ $P5=416,7$ $R-square=0,9197$	675,7200	724,4200	678,4200	616,6200	581,2000	577,6200	574,6200	504,2200	261,7200
Yükselteç Gerilimi	$Y=P1.X^4+P2.X^3+P3.X^2+P4.X+P5$ $P1=-1,049e-006$ $P2=0,0001807$ $P3=-0,01057$ $P4=0,2252$ $P5=3,372$ $R-square=0,9566$	4,7372	4,9258	4,6442	4,3474	4,2383	4,2682	4,1366	3,2914	0,9284

EK-5 (Devam) Aselsan A.Ş.'nde yapılan ölçüm sonuçlarına eğri uyumlaması yapıldığında elde edilen değerler

Çizelge 5.5. 25° C sıcaklıkta eğri uyumlaması yapıldığında elde edilen değerler

25 °C	Eşitlik	10	20	30	40	50	60	70	80	90
Dedektör Gerilimi	$Y=P1.X^4+P2.X^3+P3.X^2+P4.X+P5$ P1=8,741e-007 P2=-0,0001748 P3=0,01142 P4=-0,3175 P5=27,17 R-square=0,9786	24,9709	24,1295	23,9114	23,7925	23,4581	22,8035	21,9337	21,1635	21,0175
Ön Yükselteç Gerilimi	$Y=P1.X^4+P2.X^3+P3.X^2+P4.X+P5$ P1=3,322e-005 P2=-0,007603 P3=0,6434 P4=-26,94 P5=883,3 R-square=0,9827	670,9692	546,3512	475,7872	433,5912	402,0500	371,4232	339,9432	313,8152	307,2172
Yükselteç Gerilimi	$Y=P1.X^4+P2.X^3+P3.X^2+P4.X+P5$ P1=-1,748e-008 P2=-9,803e-006 P3=-0,002097 P4=-0,1381 P5=5,944 R-square=0,9843	4,7627	3,9396	3,4095	3,1031	2,9469	2,8632	2,7702	2,5817	2,2075

EK-5 (Devam) Aselsan A.Ş.'nde yapılan ölçüm sonuçlarına eğri uyumlaması yapıldığında elde edilen değerler

Çizelge 5.6. 30° C sıcaklıkta eğri uyumlaması yapıldığında elde edilen değerler

30 °C	Eşitlik	10	20	30	40	50	60	70	80	90
Dedektör Gerilimi	$Y=P1.X^4+P2.X^3+P3.X^2+P4.X+P5$ P1=1,515e-006 P2=-0,0002845 P3=0,01715 P4=-0,4486 P5=27,11 R-square=0,9142	24,0696	22,9644	22,6326	22,2764	21,4613	20,1164	18,5347	17,3724	17,6496
Ön Yükselteç Gerilimi	$Y=P1.X^4+P2.X^3+P3.X^2+P4.X+P5$ P1=5,39e-005 P2=-0,0138 P3=0,9457 P4=-26,67 P5=891,7 R-square=0,9673	706,9290	639,7640	630,5290	632,4840	611,8250	547,6840	432,1290	270,1640	79,7290
Yükselteç Gerilimi	$Y=P1.X^4+P2.X^3+P3.X^2+P4.X+P5$ P1=-1,224e-007 P2=4,105e-006 P3=0,001012 P4=-0,07375 P5=5,444 R-square=0,9945	4,8106	4,3871	4,1540	4,0626	4,0346	3,9626	3,7095	3,1091	1,9656

EK-5 (Devam) Aselsan A.Ş.'nde yapılan ölçüm sonuçlarına eğri uyumlaması yapıldığında elde edilen değerler

Çizelge 5.7. 35° C sıcaklıkta eğri uyumlaması yapıldığında elde edilen değerler

35 °C	Eşitlik	10	20	30	40	50	60	70	80	90
Dedektör Gerilimi	$Y=P1.X^4+P2.X^3+P3.X^2+P4.X+P5$ P1=6,119e-007 P2=-0,0001098 P3=0,006128 P4=-0,1771 P5=26,17 R-square=0,9632	24,9081	24,2987	23,9032	23,4301	22,7344	21,8182	20,8305	20,0670	19,9704
Ön Yükselteç Gerilimi	$Y=P1.X^4+P2.X^3+P3.X^2+P4.X+P5$ P1=3,409e-005 P2=-0,008611 P3=0,6557 P4=-21,21 P5=746,7 R-square=0,9807	591,8999	521,3464	495,6459	483,5864	462,1375	416,4504	339,8579	233,8744	108,1959
Yükselteç Gerilimi	$Y=P1.X^4+P2.X^3+P3.X^2+P4.X+P5$ P1=1,603e-007 P2=-3,533e-005 P3=0,002138 P4=-0,04659 P5=4,1 R-square=0,9894	3,8142	3,7664	3,8024	3,8064	3,7011	3,4476	3,0455	2,5329	1,9864

ÖZGEÇMİŞ**Kişisel Bilgiler**

Soyadı, adı : AKDOĞAN, Çetin Alp
Uyruğu : T.C.
Doğum tarihi ve yeri : 09.02.1973 Ankara
Medeni hali : Evli
Telefon : 0 (312) 277 00 61
Faks : 0 (312) 277 00 60
e-mail : cetinalp_akdogan@hotmail.com

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet tarihi
Lisans	Gazi Üniversitesi/ Elektrik Elektronik Mühendisliği	1996
Lise	TED Ankara Koleji	1990

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2000-2006	Kara Kuvvetleri Komutanlığı	Mühendis Subay
1996-2000	EMTA İnşaat A.Ş.	Proje Mühendisi

Yabancı Dil

İngilizce

Hobiler

Basketbol, Formula 1, kitap okumak