

KIRIKKALE ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELEKTRİK-ELEKTRONİK ANABİLİM DALI  
YÜKSEK LİSANS TEZİ

**“Hafif Raylı Sistemlerde Lazerli Engel Algılayıcı Sistem Tasarımı”**

Sonay GÖRGÜLÜ BALCI

HAZİRAN 2014

**Elektrik-Elektronik Anabilim Dalında** Sonay GÖRGÜLÜ BALCI tarafından hazırlanan HAFİF RAYLI SİSTEMLERDE LAZERLİ ENGEL ALGILAYICI SİSTEM TASARIMI adlı Yüksek Lisans Tezinin Anabilim Dalı standartlarına uygun olduğunu onaylarım.

Prof.Dr.Ediz POLAT  
Anabilim Dalı Başkanı

Bu tezi okuduğumu ve tezin **Yüksek Lisans Tezi** olarak bütün gereklilikleri yerine getirdiğini onaylarım.

Yrd.Doç.Dr.Murat LÜY  
Danışman

Jüri Üyeleri

Başkan : (Prof.Dr.İbrahim UZUN) \_\_\_\_\_  
Üye (Danışman) : (Yrd.Doç.Dr.Murat LÜY) \_\_\_\_\_  
Üye : (Doç.Dr.Ertuğrul ÇAM) \_\_\_\_\_

...../...../.....

Bu tez ile Kırıkkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu Yüksek Lisans derecesini onaylamıştır.

Doç.Dr. Erdem Kamil YILDIRIM  
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

## ÖZET

### HAFİF RAYLI SİSTEMLERDE LAZERLİ ENGEL ALGILAYICI SİSTEM TASARIMI

GÖRGÜLÜ BALCI, Sonay

Kırıkkale Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Elektrik-Elektronik Anabilim Dalı, Yüksek Lisans tezi

Danışman Yrd. Doç. Dr. Murat LÜY

Ortak Danışman: Doç. Dr. Ertuğrul ÇAM

Haziran 2014, 112 sayfa

Günümüzde şehir içi ve dışı toplu ulaşım sistemlerinde demiryollarının önemi daha çok artmıştır. Bu durum demiryollarındaki güvenlik önlemlerini de önemli hale getirmektedir. Bu çalışmada, demiryolu taşımacılığında önemli yere sahip olan tramvay ulaşım sisteminde oluşabilecek kaza tehditlerinin başında gelen tramvayın önüne çıkan insanların veya raylara bilerek ya da bilmeyerek düşen olası cisimlerin lazer sistemleri ile saptanarak tramvayı raydan çıkartabilecek ya da kazalara neden olabilecek durumlarının algılanması gerçekleştirilecektir. Lazer uygulamaları, gelişen teknoloji ile günümüzde birçok alanda kullanım alanı bulmuş ve bu alanda çok verimli sonuçlar elde edilmiştir.

Öncelikle lazer hakkında temel bilgi niteliğinde bilgiler verilmiş, lazer sistemlerinin en verimli şekilde kullanım amacıyla yapılan modülasyon, mod kilitleme, frekans kararlılığı sağlama gibi konulara değinilmiş daha sonra optik ve uzaklık ölçüm teknikleri, piyasadaki lazer tarayıcı çeşitleri yerli ve yabancı birçok kaynak araştırılarak ortaya konmuştur [1,2].

2012 Eylül-2014 Ağustos dönemi SAN-TEZ Projesi kapsamındaki bu tez çalışmasında 50 km/h maksimum hızla giden bir hafif raylı sistemin durma mesafesi olan ve yaklaşık 50m'de algılama sağlayabilen, insan sağlığına zararsız class-1 lazer

sinyaller ile güvenli duruş sistemi geliştirilmiştir. Lazer kaynağı tramvayın ön kısmına  $110^{\circ}$  açı ile tarama yapacak şekilde yerleştirilmiş ve lazerlerin gönderdikleri sinyallerin gidiş-geliş zamanları Uçuş Zamanı Tekniği(Time of Flight-TOF) ile ölçülerek, endüstriyel bilgisayar aracılığı ile verilen işlenmesi sonucunda yol durumunun risk analizleri yapılmış ve sayısal analiz sonuçlarına göre tramvayın tepkisi belirlenmiştir.

**Anahtar kelimeler:** Raylarda engel algılama, lazer tarayıcı, Uçuş-Zamanı Tekniği(Time of Flight-TOF), risk analizi, güvenlik.

## ABSTRACT

### DESIGNING A LAZER-BASED OBSTACLE DETECTION SYSTEM FOR LIGHT RAIL TRANSPORTATION SYSTEMS

GÖRGÜLÜ BALCI, Sonay

Kırıkkale University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of ElectricElectronic, Ph. D. Thesis

Railways have become very import nowadays for inner city and intercity mass transportation systems. As a result, safety precautions in railways have also become very important. For this reason, the detection of intentionally or non intentionally left obstacles (objects/people) which may cause tramways to derail from railways, that is the first reason of many accidents, will be achieved in this project.

Firstly, the following subjects was given in the thesis by demonstrated many domestic and foreign resources to investigated; the information on the basis of lazer, the most efficient use in order to do the modulation of the lazer system, mode locking, frequency stability of supply have been mentioned as later on optical and distance measurement techniques, lazer scanner types in the market.

For this purpose, a reliable breaking system that provides the detection in stopping length of 50m and consists of non harmful to human health class-1 lazer signals will be developed for tramways with a speed of 50km/h. The source of lazer that can scan  $110^{\circ}$  angle will be placed in front of tramway. Using industrial computers, measuring signal travel time(Time of Flight-TOF), performing risk analysis, selecting the response of tramway in digital environment and making decision of intervening of operator or intervening of control unit according to result of analysis will be achieved. In order to prevent false detection of slope and bad railways and unwanted stops, the system will be trained for the railways and the system will response with a warning sound so that the operator will get noticed of the false alarm. In this way,

continuing to move forward or making a break by selecting the brake system or giving a warning to the operator was achieved.

This project was carried out under the 2012 September 2014 August period of SAN-TEZ Project.

**Key Words:** Detection of obstacles on railway, laser scanner, Time of Flight(TOF), risk analysis, safety.

## TEŞEKKÜR

Tezimin hazırlanması esnasında hiçbir yardımı esirgemeyen ve biz genç araştırmacılara büyük destek olan, bilimsel deney imkanlarını sonuna kadar bizlerin hizmetine veren, tez yöneticisi hocam, Sayın Yrd. Dr. Murat LÜY'e, tez çalışmalarım esnasında, bilimsel konularda daima yardımını gördüğüm hocam Sayın Prof. Dr. İbrahim UZUN'a ve Sayın Doç. Dr. Ertuğrul ÇAM'a, büyük fedakarlıklarla bana destek olan aileme ve tez yazım sürecinde dünyaya gelen sevgili oğlum Mehmet Sami BALCI'ya teşekkür ederim.

# İÇİNDEKİLER DİZİNİ

Sayfa

<b>ÖZET</b> .....	iii
<b>ABSTRACT</b> .....	v
<b>TEŞEKKÜR</b> .....	vii
<b>İÇİNDEKİLER DİZİNİ</b> .....	viii
<b>ŞEKİLLER DİZİNİ</b> .....	xi
<b>ÇİZELGELER DİZİNİ</b> .....	xv
<b>1.GİRİŞ</b> .....	1
1.1.Literatür Araştırması.....	1
1.2. Tezin Kapsamı.....	4
1.3. Tezin Amacı .....	4
<b>2.MATERYAL</b> .....	5
2.1.Işık ve Elektromanyetik Dalgalar .....	7
2.2. Lazer .....	9
2.2.1. Işık Yayılmı .....	10
2.2.2. Lazerin İşleyiş Mekanizması .....	11
2.2.3. Birikim Artışı ve Işık Yükseltilmesi .....	14
2.2.4. Einstein Bağınıtları.....	15
2.2.5. Radyasyon Soğurulması .....	17
2.2.6. Nüfus Tersinmesi .....	20
2.2.7. Optik Geribesleme.....	21
2.2.8. Eşik Şartları - Lazer Kayıpları .....	23
2.2.9. Lazerlerin Bileşenleri .....	24
2.2.10. Lazer Işığının Özellikleri.....	26
2.2.10.1. Yönlenebilirlik.....	27
2.2.10.2. Demet Ahengi.....	28
2.2.10.3. Parlaklık .....	30
2.2.10.4. Lazer Radyasyonunun Odaklama Özellikleri .....	30
2.2.10.5. Ayarlanabilirlik .....	31
2.2.11. Lazer Çeşitleri .....	32



2.2.11.1. Katı Hal Lazerleri .....	32
Zenginleştirilmiş yalıtkan lazerler .....	32
Yarı İletken Diyod Lazerler .....	33
2.2.11.2. Gaz Lazerler .....	35
2.2.11.3. Sıvı Boya Lazerleri .....	36
2.2.12. Lazer Modları .....	37
2.2.12.1. Eksenel Modlar .....	38
2.2.12.2. Enine Modlar .....	39
2.2.13. Lazer Çıkışının İyileştirilme Yöntemleri .....	41
2.2.14. Lazerlerde Güç ve Enerji .....	41
2.2.15. Lazer Işınının Uygulama Alanları .....	42
2.2.16. Lazer Tehlike Sınıfları, Lazer Kullanımında Emniyet- Lazer Işınından Kaynaklanan Tehlikeler .....	44
2.1.7. Lazer Işınından Kaynaklanabilecek Tehlikeler İçin Güvenlik Önlemleri .....	46
2.3. Uzaklık Ölçüm Teknikleri .....	48
2.3.1. Triangulation(Üçgenleme) Yöntemi .....	50
2.3.2. İnterferometre .....	52
2.3.3. Uçuş Zamanı Tekniği(Time of Flight-TOF) .....	53
2.3.3.1. TIC(Time To Interval Converter) Metodu .....	56
2.3.3.2. TDC (Time to digital converter) Metodu .....	57
2.3.4. Lazer Dalga Boyu Seçimi .....	59
2.3.5. Optoelektronik sistemlerin tasarımında optik sinyallerin seçilmesi .....	61
2.3.6. Optik Sinyallerin Modülasyonu ve Demodülasyonu .....	61
2.3.7. Güç .....	63
<b>3. YÖNTEM</b> .....	<b>65</b>
3.1. BAĞLANTI VE HAZIRLIK .....	66
3.1.1. Lazer tarayıcı veri okuma .....	67
3.2. Ölçme Süreci ve Ölçümün Özellikleri .....	70
3.2.1. Çoklu-Eko Yeteneği .....	71
3.2.2. Çoklu Katman Teknolojisi .....	72

3.2.4.Filtre .....	74
3.2.5. Açısal Çözümleme ve Tarama Frekansı .....	75
3.2.6. Sistem Analizinde Kullanılan Filtre Çeşitleri .....	79
3.2.6.1. Aritmetik ortalama filtresi.....	79
3.2.6.2. Hata oranı filtresi.....	79
3.2.6.3. Kalman filtresi.....	80
3.3.Nesnelerin Çizdirilmesi .....	83
3.4. Filtreleme .....	83
3.4.1.Filtresiz Ekran Durumu .....	84
3.4.2.Yaş Sınırı Filtresi .....	85
3.4.2.Hız filtresi .....	86
3.4.3.Yön filtresi (X,Y koordinatları) .....	87
3.5. Çarpışma Olasılığının Değerlendirilmesi .....	88
3.5.1. Çarpışma olasılığı yok .....	89
3.5.2. Çarpışma olasılığı var .....	90
3.5.3. Çarpışma olasılığı çok yüksek .....	91
<b>4. SONUÇLAR VE TARTIŞMA.....</b>	<b>96</b>
4.1. Test Sonuçları.....	97
4.1.1.Test .....	97
4.1.2.Test .....	103
<b>KAYNAKLAR.....</b>	<b>110</b>

## ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>ŞEKİL</u>	<u>Sayfa</u>
2. 1. Tipik atımlı lazer telemetrenin blok düzeneği .....	5
2. 2. Lazer tarayıcısı $110^0$ açı ile tarama yapar .....	6
2. 3. Uçuş-Zaman (TOF) tekniği şematik gösterimi .....	7
2. 4. Elektromanyetik Spektrum .....	8
2. 5. (a). İki Enerjili Sistem (b). Atomun Uyarılması .....	11
2. 6. Lazer mekanizmasında dört önemli süreç: (a) pompalama (elektriksel, ışın veya kimyasal enerji ile uyarılmaları), (b) kendiliğinden emisyon, (c) uyarılmış emisyon ve (d) soğurulma .....	13
2. 7. (a) Birikim artışı olmadığı ve (b) birikim artışı olduğu durumlarda ışın geçişi. 14	
2. 8. $\Delta x$ uzunluklu ve birim kesit yüzeyli bir hacmi geçen radyasyon .....	18
2. 9. İki enerji seviyeli sistemin (a) ısıl denge ve (b) nüfus tersinmesi sonrası nüfusları .....	20
2. 10. Uyarılmış emisyon ile lazer ışınının elde edilmesi .....	21
2. 11. Sıklıkla kullanılan lazer rezonatör ayna şekilleri (noktalı çizgiler mod hacminin genişliğini göstermektedir.) .....	22
2. 12. Tipik bir lazer kaynağının şematik gösterimleri .....	25
2. 13. Lazer rezonatorü dışında bir lazer demetinin dağılması .....	27
2. 14. Ahengin gösterilmesi .....	29
2. 15. Üç değişik malzeme türündeki değerlik ve iletkenlik bandları .....	34
2. 16. Lazer çeşitlerinin Dalgaboylarına Göre Gösterimi .....	35
2. 17. Tipik bir boya lazeri soğurma ve salma (floresans) spektrumu. ....	37
2. 18. Pompalama oranının bir fonksiyonu olarak tersinir birikim ve lazer güç çıkışı. ....	37
2. 19. (a) Genişletilmiş lazer geçiş çizgisi; (b) rezonatör modları (c) lazer çıkışındaki aksenal modlar. ....	39
2. 20. (a) Enine modların oluşmasına sebep olan aksenal olmayacak şekilde kendini tekrarlayan ışın örneği (b) $TEM_{01}^*$ modu $TEM_{01}$ ve $TEM_{10}$ modlarının bir kombinasyondur. ....	40

2. 21. Lazer güç darbeleri.....	42
2. 22. Gözdeki su tabanlı dokuların ve hemoglobinin lazer ışın demetini yutması.....	47
2. 23. Tipik atımlı lazer telemetrenin blok düzeneği .....	48
2. 24. Sol taraftaki pasif, sağ taraftaki aktif TOF üçenleme yoluyla mesafe algılama.....	50
2. 25. Triangulasyon Prensibi: Tek Kamera Çözümü.....	51
2. 26. Triangulasyon Prensibi: İki Kamera Çözümü .....	52
2. 27. Michelsen İnterometri Çalışma Prensibi .....	52
2. 28. Uçuş zamanı prensibi .....	53
2. 29. Uçuş-Zaman (TOF) tekniği şematik gösterimi .....	54
2. 30. a) Uçuş zamanı süresince geçen zamana göre ölçüm b)Uçuş zamanı süresince oluşan faz farkına göre ölçüm .....	55
2. 31. TIC (Time to interval converter) ile yapılan ölçme tekniği.....	56
2. 32. TDC (Time to digital converter) ile yapılan ölçme tekniği .....	57
2. 33. TOF Modülasyon Prensibi ve 3D TOF gerçekleştirilmesi .....	58
2. 34. Hedef yansıtıcılığına göre Maksimum lazer menzili için Düzeltme Faktörü(Riegl Firması 900 nm dalga boyunda etki hedefleri, verilen maksimum menzile bağlı olarak % 80 yansıtma için düzeltme faktörü).....	60
2. 40.Lazer sinyalinin üç farklı modülasyon yaklaşımı ile gösterimi .....	62
3. 1. Lazer tarayıcı ile nesnenin algılanması .....	65
3. 2. Lazer Sistem Çalışma Mantığı.....	66
3. 3. Koordinat Sistemi Program Görüntüsü .....	67
3. 4. Veri özeti .....	69
3. 5. Çoklu Eko Yeteneği 1)Cam panel ekosü 2)Yağmur damlası ekosü 3)Eşik Voltajı 4) Nesneye ait Eko .....	71
3. 6. Çoklu Katman Teknolojisi 1)LD-RMS 2)Tarama düzlemi 3)Nesne.....	72
3. 7. Renk Kodlu Tarama Düzlemleri 1)Dikey açıklık açısı 2)Dört tarama düzleminde biri 3)LD-MRS .....	72

Şekil 3. 8. Tarama Alanı 1)Merkezi çalışma aralığı(yeşil), 2)Yanal tarama alanı(açık yeşil), 3)LD-MRS .....	73
3. 9. Tarama mesafesi açılı ilişkisi,1)Üstteki düzlemlerin eğrisi, 2)Altındaki düzlemlerin eğrisi .....	74
3. 10. Lazer Darbesine ait örnek üç eko 1)Cam Panel ekosu, 2)Yağmur damlası ekosu, 3)Nesne ekosu.....	75
3. 11. Açısal Çözümleme .....	75
3. 12. $0.25^\circ$ ve $d = 25$ m (82 ft)mesafede Açısal Çözünürlük .....	75
3. 13. Sektörlere göre değişik Açısal Çözünürlük verileri, 1)Merkezi alanın $0.125^\circ$ çözümü, 2)Orta alanın $0.25^\circ$ çözümü, 3)Yanal alanın $0.5^\circ$ çözümü, 4)LD-MRS .....	77
3. 14. Noktaların Koordinat Sisteminde Çizilmiş Durumu .....	78
3. 15. Arda arda yapılan iki ölçüm hatası.....	79
3. 16. Örnek Nesne Oluşturma .....	80
3. 17. Nesne Hareket Tespit Algoritması .....	81
3. 18. Nesne Veri Türü Tespiti Program Görüntüsü.....	83
3. 19. Filtresiz Ekran görüntüsü.....	84
3. 20. Yaş Sınırı Filtreli Ekran Görüntüsü .....	85
3. 21.Hız Filtreli Ekran Görüntüsü .....	86
3. 22.Yön Filtreli Ekran Görüntüsü .....	87
3. 23. Nesnelerin Filtrelenmesi.....	87
3. 24. Çarpışma Olasılığının Değerlendirilmesi .....	88
3. 25. Çarpışma Olasılığı Yok .....	89
3. 26. Çarpışma Olasılığı Var. ....	90
3. 27. Çarpışma Olasılığı Çok Yüksek.....	91
3. 28. Olası Çarpışma Zamanı .....	92
3. 29.Verilerin içerikleri ve ekran çıktıları .....	93
3. 30. Gönderilen veriler(ayarlar) .....	95

4. 1. Hatta bulunan başka bir demir yolu aracı, $V=0$ km/s.....	97
4. 2. Hattaki aracın hızı $V=2$ km/s. iken(filtreleme hızının altında) ekran görüntüsü .....	98
4. 3. Hattaki aracın hızı $V=5$ km/s. iken(filtreleme hızına eşitken) ekran görüntüsü .....	99
4. 4. Hattaki aracın hızı $V=6$ km/s. iken(filtreleme hızı aşıyor) ekran görüntüsü, uyarı zili çalıyor. ....	100
4. 5. Hattaki aracın hızı $V=7$ km/s. iken tehlikeli alanın içerisindeyken ekran görüntüsü, uyarı zili çalmaya devam ediyor. ....	101
4. 6. Önümüzdeki obje tehlikeli bölgenin içinde, tespit edilen hareket yönü çarpışma tehlikesi.....	102
4. 7. İnsanın araca doğru koşması( $V=8$ km./s) yönü henüz kesin çarpışma ihtimali olmadığından dolayı sadece zil uyarısı yapılıyor. ....	103
4. 8. İnsanın araca doğru koşması( $V=11$ km./s) yönü kesin çarpışma ihtimali olduğundan dolayı sadece zil uyarısı yapılıyor. ....	104
4. 9. İnsanın araca doğru koşması( $V=14$ km./s) yönü kesin çarpışma ihtimali olduğundan dolayı zil uyarısının yanında otomatik frenleme de yapılıyor. ...	105
4. 10. İnsanın araca doğru koşması( $V=12$ km./s) yönü kesin çarpışma ihtimali olduğundan dolayı zil uyarısının yanında otomatik frenleme de yapılıyor. ...	106
4. 11. İnsanın araca doğru koşması( $V=13$ km./s) fakat yönü değişmiştir. Kesin çarpışma ihtimali olduğundan dolayı zil uyarısının yanında otomatik frenleme de yapılıyor. ....	107
4. 12. İnsanın araca doğru koşması( $V=15$ km./s. Kesin çarpışma ihtimali olduğundan dolayı zil uyarısının yanında otomatik frenleme de yapılıyor. ...	108
4. 13. Çarpışma tehlikesi yoktur. Frenleme kaldırılmıştır. ....	109

## ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>ÇİZELGE</u>	<u>Sayfa</u>
2. 1. Elektromanyetik Dalga Türleri .....	8
2. 2. Işığın dalga boylarına göre bölgelere ayrılması.....	9
2. 3. Tipik lazer demeti dağılma açıları .....	28
2. 4. Sık kullanılan lazerlerin ahenk mesafeleri.....	30
2. 5. Lazer Cihazlarının Göze Verdiği Zarara Göre Sınıflandırılması.....	45
2. 6. Lazer tarayıcı tasarımında hedeflenen değerler ve standartlar .....	46
2. 7. Lazer Sınıflandırmasına Göre Güvenlik Gereksinimleri.....	47
2. 8. Temassız 3 Boyutlu Şekil Ölçümü Diyagramı .....	49
2. 9. 900 nm. lazer ışığının çeşitliği yüzeyler üzerinden yansıma değerleri (Riegl web sayfası) .....	59
2. 10. Çeşitli lazer tarayıcı sistemlerinin teknik özellikleri.....	64
3. 1. Okunan Veri Paketi İçeriği .....	68
3. 2. Nokta Listesi Dizi Formatı .....	68
3. 3. Sinyal Yankı Durumu.....	73
3. 4. 0.125° Açısal Çözünürlük ile Tarama Verileri .....	76
3. 5. 0.25° Açısal Çözünürlük ile Tarama Verileri .....	76
3. 6. 0.5° Açısal Çözünürlük ile Tarama Verileri.....	76
3. 7. Okunan Veri Paketi İçeriği .....	81
3. 8. Nesne Dizi Formatı .....	82
3. 9. Referans Dizi Formatı (Point2d).....	82
3. 10. Boyut Dizi Formatı (Size2d).....	82
3. 11. Veri içerikleri .....	93
3. 12. Gönderilen Veriler(ayarlar) .....	94
3. 13. Haberleşme protokolü örneği.....	95

## 1.GİRİŞ

Enerji kaynaklarının sınırlı ve maliyetlerinin çok yüksek olduğu günümüzde toplu taşıma araçları kullanımı gün geçtikçe artmaktadır. Toplu taşıma araçlarının artması ise güvenlik tedbirlerini ve kontrol mekanizmalarını da üst düzeyde kullanma gereğini ortaya çıkartmıştır. Bu gelişmelere bağlı olarak toplu taşıma araçlarında meydana gelebilecek kazalarda toplu ölümler ya da mal kayıpları söz konusu olabileceğinden bu araçlarda iç ve dış güvenlik sistemlerinin önemi arttırmış, dolayısıyla ek güvenlik sistemleri de önemli hale gelmiştir.

Bununla ilgili olarak özellikle radar mantığı ile çalışan kamera sistemlerin ray, köprü, tünel gibi sabit noktalara veya hareket halindeki araç üzerine takılarak yol güvenliğinin izlenmesinin eksiklikleri zaman içerisinde kendini gösterdiğinden bu çalışmada önerilen sistem ile, Bursa ilinde faaliyet gösteren Durmazlar Holding bünyesinde yapılan ilk yerli tramvay *İpekböceği* üzerine monte edilen lazer tarayıcıdan alınan verilere göre sürücüyü uyarma veya otomatik frenin devreye alınması gibi önemli gelişmeler gerçekleştirilmiştir. Alınan sonuçlar geliştirilen sistemin etkin olarak kullanılabilmesi ve tren için zorunlu olan standartlara uyumluluğunun sağlanması durumunda yaygın olarak kullanımı söz konusu olabileceğini göstermektedir.

### 1.1.Literatür Araştırması

Raylı sistemlerde güvenlik konulu literatür taramasında incelenen makalelerde; KarasalMobilLazerTaramaSistemleri hakkındaki bir çalışmada Mobil Lazer Tarama Sistemleri(Mobile Lazer Scanning System-MLS) teknolojisinin günümüzde iyi kurulmuş ve kanıtlanmış sonuçlarının olduğunu Havadan Lazer Tarama(Airborne Lazer Scanning-ALS),KarasalLazer Tarama (Terrestrial Lazer Scanning -TLS) sistemleri ile karşılaştırarak sunmuştur[3].



Wehr ve Lohr'un Havacılıkta Lazer Tarama[4] konulu makalesinde havadan lazertarama(ALS) tekniği ile çeşitli mesafelerin ölçümü ve yüzü üzerindeki nesnelere üzerinden yansıması konularında çalışmalar yapılmıştır. Yapılan çalışmada temellazer ilkeleri, iki ana sınıfta darbe ve sürekli dalgalazerler şeklinde incelenmiştir. Ayrıca tez konumuzu oluşturan Uçuş-Zamanı Tekniği(Time of Flight-TOF) tekniğinin mesafe, çözünürlük ve hassasiyetle ilgili ilişkilerine değinilmiştir. Farklı tarama mekanizmaları ile konumunu ve yönünü tayin eden GPS ve INS sistemleri ile lazer tarayıcı entegrasyonu sunulmaktadır. Sayısal arazi ve yüzey modellerinin çıkarımı için veri işleme zincirine değinilmiştir.

Kasap'ın 3d Nesne Modellemeye Yönelik Lazerli Bir Tarayıcı Sistemin Tasarımı ve Gerçekleştirilmesi konulu yüksek lisans tez çalışmasında[5] lazerle aktif tarama tekniği kullanılarak taranan nesnenin noktalar kümesinden oluşan 3 boyutlu modelini çıkaran bir çalışma gerçekleştirilmiştir.

Berbercuma'nın Üç Boyutlu Tarayıcılar İle Veri Toplanması ve Cad Ortamına Değişik Formatlarda Aktarılması konulu yüksek lisans çalışmasında[6] imalat teknolojisinde artan bir ivme ile uygulama alanlarına giren 3 boyutlu tarayıcılar(3d scanner) incelenmiş; konu ile direkt bağlantısı olan Tersine Mühendislik prosesi araştırılmış ve Koordinat Ölçme Cihazları (CMM) da dahil edilerek kapsamlı bir çalışma yapılmıştır. Çalışmanın sonunda 3 boyutlu tarayıcılar ile CMM arasındaki farklar belirtilmiş ve tezin inceleme örneği olan türbin çarkı 3 boyutlu tarayıcıda taranmış ve tersine mühendislik prosesi ile nokta bulutundan CAD ortamında Unigraphics NX programı kullanılarak tekrar oluşturulmuştur.

Gümüş ve Erkaya'nın Mühendislik Uygulamalarında Kullanılan Yersel Lazer Tarayıcı Sistemler konulu makalesinde[7] hızlı ve minimum giderle çok detaylı bir şekilde 3 boyutlu (3B) bilgi ihtiyacının günümüzde hızlı ve ucuz bir şekilde lazer tarama teknolojisi ile mümkün olabileceğine değinmiştir. Yersel lazer tarayıcı sistemi (TLS) nin çeşitlerine değinilmiş ve taranacak uygulama alanı olarak tarayıcının görüş alanı dikkate alınarak, KOSGEB Binasının giriş yönüne göre sağ ve sol cephelerinin taranmasına kararlaştırılmış ve tarayıcı kurulacak noktalar belirlenmiştir. Bu iki cephe taramalarının birleştirilmesi, iki tarama alanını kapsayan,

tarama bölgelerinde ortak bulunan belirgin noktalar yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Bu işlemler POLWORKS yazılımında yapılmış, farklı noktalardan taramalar yapıldıktan sonra, nokta bulutları PARSER programında PIF formatına dönüştürülerek POLYWORKS yazılımında düzenlenmiştir.

D.L.Anderson'ın yeraltı madenciliğinde lazer ile tramvay kontrol sistemlerinin test raporunun[8] ilk bölümünde lazer sensörler, iletişim ağı ve bilgisayar donanımı ayrıntılarına yer verilmiş, sonraki bölümde yeraltı tramvay manevralarını izleme ve kontrol sisteminin yeteneklerini gösteren deney sonuçlarına yer verilmiştir.

R.Lange'in ile CMOS/CCD görüntüleme sensörleri yardımıyla Time Of Flight tekniği ile 3D nesne görüntüleme(optik 3D TOF) içeren doktora tezinde[12] TOF tekniğinin çeşitlerine ve avantaj ve dezavantajlarına değinilmiştir. Şimdiye kadar TOF sisteminde 3D görüntüler elde etmek için lazer tarayıcılarda yalnızca 1D ölçüm sistemleri (nokta ölçüm) kullanılırdı. Böyle TOF tarayıcıların, hantal, pahalı, yavaş, titreşime duyarlı ve bu nedenle sadece sınırlı uygulama alanları olduğu ancak R.Lange bu çalışmasında 3D kameralar ile piksel demodülasyonu kullanılarak açık renkler kameraya yakın, koyu renkler uzak şeklinde görüntü işleme gerçekleştirilmiştir. Bu sistemin dezavantajı tarama yapan kameranın yeri sabit kalmaktadır.

Nieuwenhove ve arkadaşları Akım Destekli Demodülatör (CAPD) destekli TOF optik mesafe sensörü konulu makalesinde[9] CAPD'ın TOF optik mesafe sensörü ilişkilendirilmesi incelenmiştir. Öncelikle mesafe bilgisi gönderilen sinyal ile alınan modüle ışık ilişkilendirilmiş, simülasyonlar ve ölçümlerle yapının gerçek zamanlı 3D kamera piksel yapılandırmasına uygun olduğunu gösterilmiştir.

M.Özcan ve arkadaşları, Lazer Cihazlarının İnsan Sağlığı Açısından Değerlendirilmesi ve Zararlı Etkilerinin Giderilmesi konulu çalışmasında[10] lazer cihazlarının oluşturabileceği tehlikelere göre sınıflandırılması, lazer cihazı ile çalışırken alınması gereken tedbirlerden bahsedilmektedir.

## 1.2. Tezin Kapsamı

Günümüzde şehir içi ve dışı toplu ulaşım sistemlerinde demiryolları çok önemli hale gelmiştir. Bu durum demiryollarındaki güvenlik önlemlerini de önemli hale getirmektedir. Bu amaçla, demiryolu taşımacılığında önemli yere sahip olan tramvay ulaşım sisteminde oluşabilecek kaza tehditlerinin başında gelen, tramvayın önüne çıkan engellerin saptanması veya raylarına bilerek ya da bilmeyerek düşen cisimlerin belirlenmesi, böylece tramvayı raydan çıkartabilecek yada kazalara neden olabilecek durumlarının algılanması gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın gerçek zamanlı olması amacıyla Bursa ilinde çalışmakta olan içerisindeki Durmazlar Makine Sanayi A.Ş. tarafından üretilmiş bir tramvay(İpekböceği), test aracı olarak kullanılmıştır. Çalışmada, hareket halindeki bir hafif raylı sistemin, insan sağlığına zararsız sınıf-1 lazer sinyaller yardımıyla çevresi taranmış ve çeşitli filtreleme işlemlerinden geçirilerek oluşturulan güvenlik alanı, tramvay sürücüsünün önündeki ara yüz ekranında gösterilerek uyarılar yapılmıştır. Sonuç olarak sistem, belirli açılarda etrafındaki cisimleri 2-boyutlu olarak algılayıp arayüz ekran ile sürücüyü bilgilendirmeyi başarmanın yanında, yapılan yazılımla tramvay güvenlik sistemi entegrasyonu tamamlanmış, yapılan tehlike analizlerine göre uyarı ve/veya fren tertibatının otomatik olarak devreye girmesi başarılmıştır.

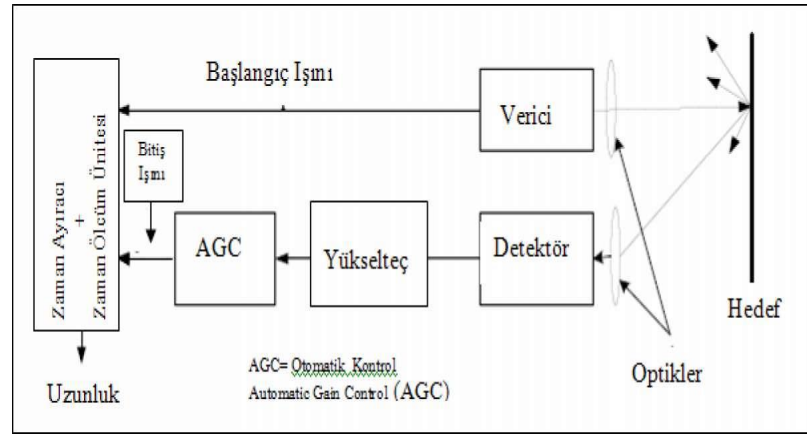
Alınan sonuçlar sistemin, standartlara uyumluluğunun sağlanması durumunda, tüm dünyada kullanılabilir hale getirilebileceğini göstermiştir.

## 1.3. Tezin Amacı

Çalışmada, hareket halindeki hafif raylı sistemin, insan sağlığına zararsız sınıf-1 lazer sinyaller yardımıyla ray güzergahı taranarak elde edilen veriler çeşitli filtreleme işlemlerinden geçirilerek oluşturulan güvenlik alanı, tramvay sürücüsünün önündeki ara yüz ekranında gösterilerek uyarılar yapılmasının sağlanması, ilave olarak da analizlere göre öngörülen çarpışmayı önlemek için sürücüden bağımsız olarak otomatik uyarı ve/veya fren tertibatının devreye sokulması ana hedeflerdir.

## 2.MATERYAL

Lazer tarama sistemi verici, alıcı, ölçüm üniteleri ve optik elemanlardan oluşurlar. Şekil2.1.'de, blok şema olarak tipik bir lazer sistemi gösterilmiştir[7].



Şekil 2. 1. Tipik atımlı lazer telemetrenin blok düzeneği

Lazerler; yüksek güç, kısa darbe, Sürekli Dalga(Continuous Wave-CW) sistemlerinde sinyalin modüle edilebilme, yüksek yönlendirilebilme ve dar optik spektrumda yayılma gibi fiziksel özelliklerinin avantajları sebebiyle tarayıcılarda kullanılır. Işık dalgası ( $\lambda=0.5-1\mu\text{m}$ . ve 300-600 THz.) aracılığıyla yol alan lazer ölçüm sistemlerinde başlıca üç teknik kullanılır; Üçgenleme(Triangulasyon), İnterferometri ve Uçuş-Zamanı Tekniği(Time of Flight-TOF)'dir. Bu tekniklerin hepsi ışık yoluyla çalışır. 400-1000 nanometre görünür ve yakın kızıl ötesi(Near Infrared-NIR) spektrum'da çalışırlar[11].

Bu çalışmada Time of Flight, (TOF), olarak bilinen Uçuş Zamanı tekniği kullanılarak tramvayların önündeki engellerin tanınması amaçlanmıştır. TOF tekniğinde tarayıcı tipik Elektromanyetik Radyasyon, (ER), darbeleri yayar. Bir lazer ışını nesneye gönderilir ve gönderici ile yüzey arasındaki mesafe, sinyal iletimi ile alımı arasındaki seyahat zamanı ile ölçülür. Motor eksenli merkez istasyon ile tarayıcılar, lazer ışının açılma sapması için küçük dönüş aletleri kullanırlar ve nesne üzerinden yansarak

gelen ışın dahili mikroişlemcide basit algoritmalar kullanılarak mesafe bilgisinin elde edilmesini sağlar. Uzaklık ölçümlerinin tipik standart sapmaları, birkaç milimetre olmaktadır[7].

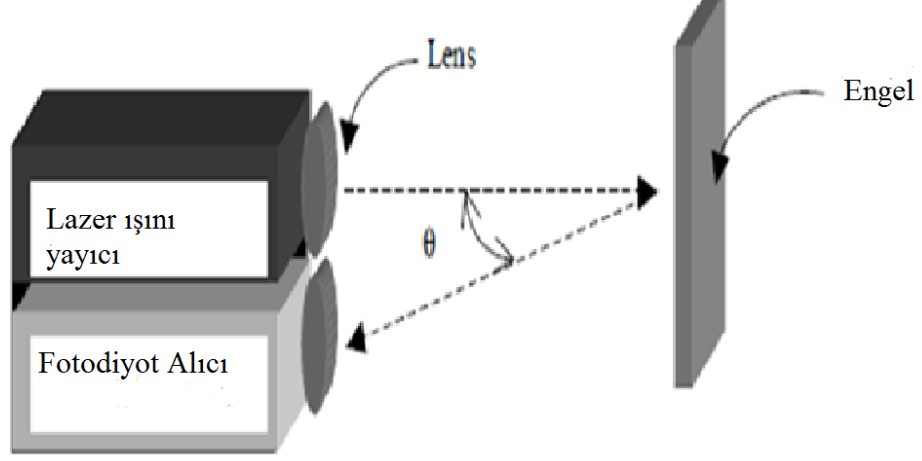


**Şekil 2. 2.** Lazer tarayıcısı  $110^{\circ}$  açı ile tarama yapar.

Şekil 2.2.'de lazer tarama sistemi kurulan tramvay(İpekböceği) görülmektedir. Hedefin tarayıcıya olan uzaklığı, ölçülen geri dönüş süresi ile sabit olan ışık hızından yola çıkarak hesaplanır. Objenin uzaklığı R, lazer darbesinin kat ettiği yolun yarısı kadardır ve şu şekilde hesaplanır:

$$R = ct/2$$

Burada c, ışık hızı ve t, zamanı göstermektedir. Bu metot ile kısa mesafelerden uzun mesafelere kadar, yüksek hassasiyette mesafe ölçümü yapılabilir. Kısa mesafeleri herhangi bir özel hedeflemeye ihtiyaç duymadan noktasal olarak ölçebiliriz. Ayrıca, saniyede birkaç örnekleme ile uzun kilometre mesafelerinin ölçümü de yapılabilir. Pratikte uçuş zamanı ürünleri, daha çok yüksek mesafeleri, hızlı bir şekilde ölçmek için kullanılan bir tekniktir. Şekil 2.3.'te, TOF lazer sistemlere ait blok diyagramını göstermektedir.



**Şekil 2. 3.** Uçuş-Zaman (TOF) tekniği şematik gösterimi

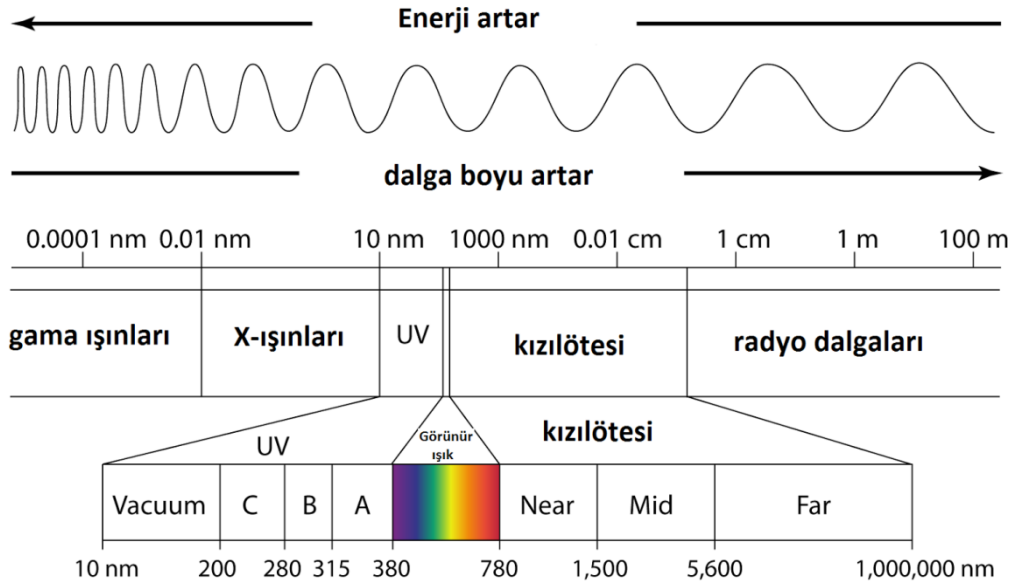
Pratikte  $\theta$  açısı çok küçüktür ve bunun TOF mesafe ölçümünde bir etkisi olmaz. Kullandığımız lazer tarayıcı modül; Modüle edilmiş ışık kaynağı ve elektrooptikal modülatör, Saptama ve Demodülasyon ve 3 Boyutlu TOF Ölçümü bölümlerinden oluşmaktadır. Kullanılacak sistemdeki lazer optik dalga boyu seçimi lazer tarama dizaynı ile bağlantılıdır. En hassas lazer tarayıcılar 800nm ile 1000 nm. arasındadır. Daha yüksek enerji darbeli lazerlerde(>1000nm.) göz güvenliği(eye-safe) hassasiyeti düşmektedir.

Lazerin dalga boyuna karar verilirken, hedef yüzeyinden geri saçılmalar göz önüne alınmalıdır. Su, kum, bitki örtüsü yansımaya katsayıları dikkate alındığında 810 nm dalga boyundaki lazer seçimi daha uygun olacaktır. Lazer ışınının dalga boyu hedef üzerinden yansımaları maksimum menzili etkiler. Bu nedenle üretici firmalar lazer ışınının maksimum menziline, hangi tür yansımanın olabileceğini, yansımaya katsayısını belirtirler. Kullanılan sistemde buna uygun olarak göze zararı olmayangöz güvenliği(eye safe)-1 sınıfı 800nm lazer kullanılmıştır[4].

### 2.1. Işık ve Elektromanyetik Dalgalar

Lazerler ışın enerjisini yükseltebildikleri için, çok şiddetli ışın demetleri üretirler. Uyarılmış emisyon ile dalga boyu aralığı çok dar (0,01 mm veya daha az) ve

olağanüstü ölçüde uyumlu ışınlar elde edilebilir. Lazerler elektromanyetik spektrumun ultraviyole, görünür ve infrared bölgelerinde önemli bir kaynak olarak kullanılmaktadır. Lazer kullanımının birkaç dalgaboyu veya çizgi dışında kullanılamaması sorunu, boyar madde lazerleri ile çözülmüştür; bu tip lazerle belli bir aralıkta, istenilen dalga boyunda(çalışma aralığı, boya maddesi değişikçe değişir.), lazer ışını üretebildiler. Elektromanyetik (EM) dalga (Şekil 2.4. ve Çizelge 2.1.) kendi dalga boyuna göre farklı kategorilerde gruplandırılmıştır.380-780 nm.dalga boyu aralığındaki ışınlar çıplak gözle görülebilmektedir [13].



Şekil 2. 4. Elektromanyetik Spektrum

Çizelge 2. 1. Elektromanyetik Dalga Türleri

Elektromanyetik Dalgalar	Dalga Boyu
Gamma ışını	< 1pm or 10-12m
X ışını	1pm to 1nm or 10-12m to 10-9m
Ultraviyole ışın	1nm to 400nm or 10-9m to 400x10-9m
Görülebilir ışın	400nm to 700nm or 400x10-9m to 700x10-9m
Yakın kızılötesi ışın	700nm to 2mm or 700x10-9m to 2x10-6m
Kızılötesi ışın	2mm to 1mm or 2x10-6m to 10-3m
Mikrodalga	1mm to 10cm or 10-3m to 10-1m
Hava radar	around 10cm
FM Radyo	2.8m to 3.4m
Kısa Dalga	10m to 100m
AM Radyo	200m to 500m

**Çizelge 2. 2.** Işığın dalga boylarına göre bölgelere ayrılması

<b><u>Renk</u></b>	<b>Dalgaboyu aralığı</b>	<b>Frekans aralığı</b>
Kırmızı	~ 625 to 740 nm	~ 480 to 405 THz
Turuncu	~ 590 to 625 nm	~ 510 to 480 THz
Sarı	~ 565 to 590 nm	~ 530 to 510 THz
Yeşil	~ 525 to 565 nm	~ 580 to 530 THz
Turkuaz	~ 500 to 520 nm	~ 600 to 580 THz
Mavi	~ 430 to 500 nm	~ 700 to 600 THz
Mor	~ 380 to 430 nm	~ 790 to 700 THz

## 2.2. Lazer

Lazer kelimesi “Uyarılmış Radyasyon Salınımlarıyla(emisyon) Işığın Kuvvetlendirilmesi” anlamına gelen (Light Amplification by Stimulated of Raditon) bir kısaltmadır.

Albert EINSTEIN 1917 yılında uyarılmış salma işleminin var olması gerektiğini göstermesine rağmen, somut çalışmaların başlaması ancak 1960 yılında T.H.MAIMAN’ın yakut ile optik frekanslarda bir lazer çalıştırmayı başarabilmesiyle gerçekleşmiştir[1].

Lazer cihazı, tek renkli güçlü bir ışık üretir. Lazer ışığı, aktive olmuş doğal gazların, elementlerin, moleküllerin ve çeşitli kristallerin etkileşimi ile yüksek yoğunlukta, tek renkli(monochrome), oldukça düz(birbirine paralel), aynı frekans ve aynı fazda paralel dalgalar halinde ilerleyen, genliği yüksek elektromanyetik radyasyondan oluşan ışık demeti olma özelliklerini taşımaktadır[2].

Normal ışık farklı faz ve frekansa sahip dalgalardan meydana geldiği için dalga boyları ve renkleri çeşitlilik gösterir böylece lazer ışımının aksine doğada kendiliğinden yok olurlar.



Lazer ışınının elde edilmesi prensip olarak bir metal telin sıcaklığının arttırılmasıyla kızılâşarak ışık yaymasına benzemektedir. Metal atomlarına ısı enerjisi verilerek, üst kat enerji seviyelerine ( $E_2$ ) hareketlilikleri sağlanan atomlar,  $10^{-8}$  s gibi bir zaman süresinde kendiliğinden ve aniden alt kat enerji seviyelerine ( $E_1$ ) geçerler. Bu geçiş esnasında daha önce alınan elektromanyetik dalga enerjisi, ışın yani foton olarak açığa çıkmaktadır.

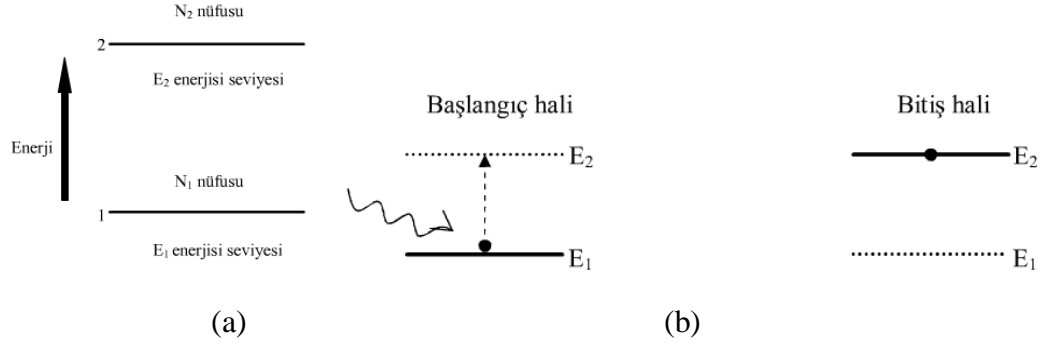
Temel enerji seviyesindeki bir atom daha yüksek bir enerji seviyesine; ısıtılarak, basınç uygulanarak, hızlandırılmış parçacıklarla bombardıman edilerek, hızlandırılmış elektronlarla bombardıman edilerek, bir ışık demetinin etkisine maruz bırakılma yöntemlerinden biriyle çıkartılabilir.

### 2.2.1. Işık Yayılımı

Doğada bulunan her elementin temel yapısını oluşturan atomlar farklı sayılarda enerji seviyelerine sahiptir. Atomdaki bir elektron iki enerji seviyesi veya hali arasında geçiş yaparsa ya bir foton salar ya da soğurur. İki enerji seviyesi farkı  $\Delta E$  ile gösterilirse,  $\Delta E/h = \nu$  frekanslı bir foton dalgasını ortaya çıkartır.

Burada  $h$  Planck kuantum sabiti olup,  $6.623 \cdot 10^{-32}$  Js dir. Sözkonusu floresans ışığı ışık hızı ile yol aldığına göre  $c$  ışık hızı olmak üzere dalga boyu  $\lambda = h \cdot c / \Delta E$  eşitliği ile verilir ( $c = \lambda \cdot \nu$ ).

Şekil 2.5a'da gösterildiği gibi bir atom için  $E_1$  ve  $E_2$  ( $E_2 > E_1$ ) olmak üzere iki enerji seviyesi olduğunu farz edelim.  $N_1$  ve  $N_2$  ise atomun enerji seviyelerindeki elektron miktarlarını göstermektedir. Atomun denge halindeki temel enerji seviyesini  $E_1$  olarak düşünürsek, bu atomun enerji seviyesini  $E_2$  seviyesine yükseltmek için uyarılma denilen müdahalenin atoma uygulanması gerekir[1].



Şekil 2. 5. (a). İki Enerjili Sistem

(b). Atomun Uyarılması

### 2.2.2. Lazerin İşleyiş Mekanizması

Lazerin işleyiş mekanizması Şekil 2.6.'da verilen dört sürecin incelenmesi ile anlaşılabilir. Bunlar başlıca: (a) pompalama, (b) kendiliğinden emisyon (floresans), (c) uyarılmış, emisyon, (d) soğurulma olarak sıralanabilir. Bu şekilde, birçok molekülden sadece ikisinin lazer oluşturma ortamındaki davranışlarını görüyoruz. İncelenen iki elektronik enerji seviyelerinin enerjileri  $E_y$  ve  $E_x$  olarak gösterilmiştir. Elektronik seviyelerdeki farklı titreşim seviyelerinin enerjileri de büyüyen sıralarda  $E_y$ ,  $E'_y$ ,  $E''_y$  olarak gösterilmiştir. Daha düşük elektronik enerji seviyelerinde de titreşim seviyeleri mevcut olmasına rağmen şekillerde yer verilmemiştir.

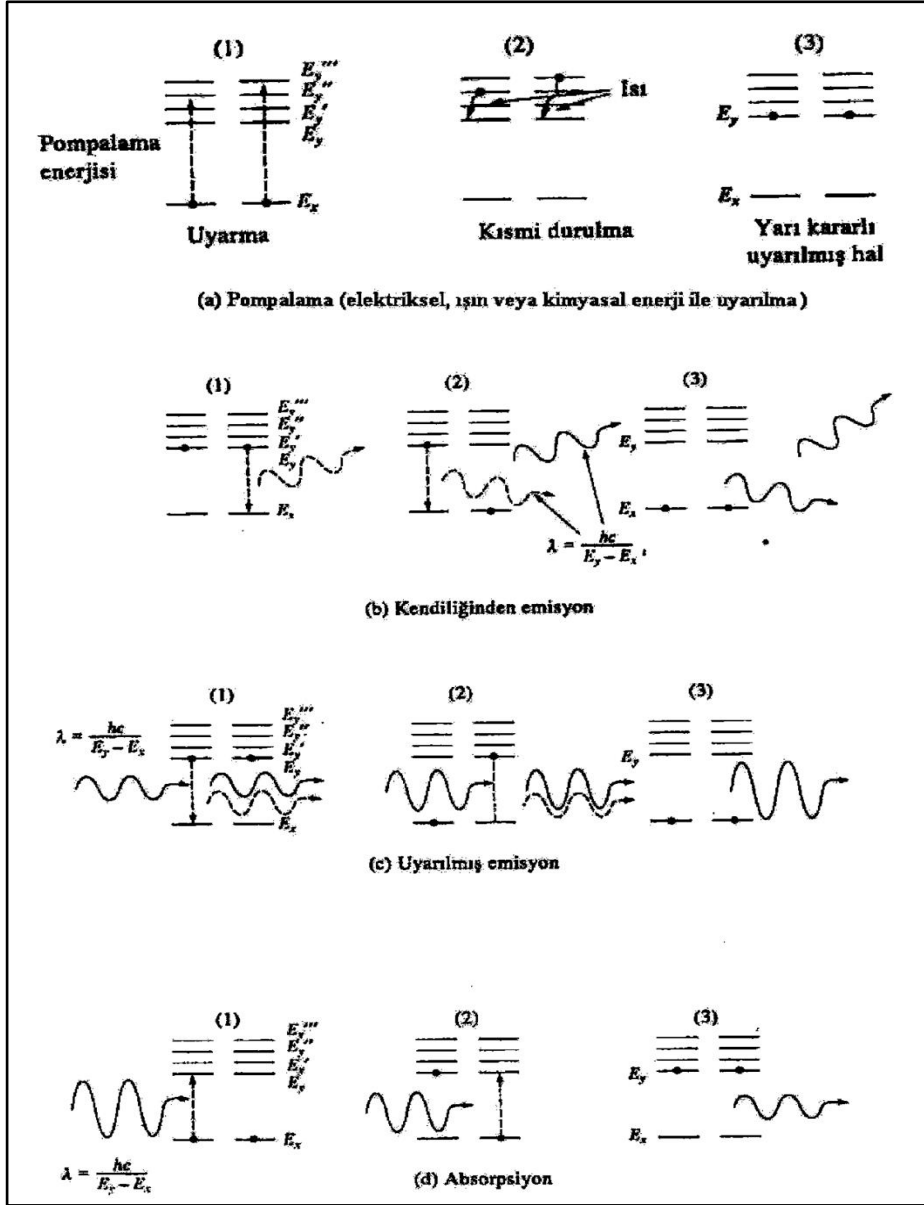
**Pompalama:** Lazerdeki foton yayımlayıcı aktif türün, bir elektrik boşalımı, elektrik akımı geçişi veya şiddetli bir ışın kaynağına maruz bırakma sonucu uyarılmasıdır. Lazer oluşturmak için bu basamak gereklidir. Pompalama işlemi sırasında yüksek titreşim ve elektronik enerji seviyelerindeki aktif türlerin birikimi artar. Şekil 2.6(a)'daki (1) diyagramında, bir molekülün  $E''_y$ ; diğerinin biraz daha yüksek  $E''_y$  seviyesine uyarıldığı görülmektedir. Uyarılmış titreşim seviyelerinin ömrü kısa olup molekül  $10^{-13}$ - $10^{-15}$  s içinde, en düşük titreşim enerjisine sahip uyarılmış hal olan  $E_y$  düzeyine durulur [diyagram a(3)]. Açığa çıkan enerji, sıcaklığa çok küçük bir katkıda bulunur. Elektronik enerji seviyeleri arasındaki geçişlerin ömürleri bağlı

olarak uyarılmış titreşim düzeylerine oranla daha uzundur (yaklaşık 1 ms veya daha büyük). Bu sebeple uzun ömürlü bu düzeylere *yarı kararlı* düzeyler adı verilir.

**Kendiliğinden Emisyon(Salınım):** Daha önce floresans ile ilgili açıklamalarda bahsedildiği üzere, uyarılmış seviyelerde bulunan türler, fazla enerjilerinin tamamını veya bir kısmını serbestçe ve kendiliğinden ışıma yaparak azaltabilir. Bu süreç Şekil 2.6(b)'de üç diyagram ile gösterilmiştir. Burada floresans ışınım dalga boyu  $X = hc/(E_y - E_x)$  eşitliği ile verilir ki,  $h$  Planck sabiti  $c$  de ışık hızıdır. Burada dikkat edilmesi gereken önemli bir husus, oluşan fotonların oluştukları zamanın ve aldıkları yolun uyarılmış, molekülden moleküle değişmesidir. çünkü kendiliğinden emisyon rastgele bir olaydır. Örneğin diyagram b(1)'deki türlerden biri tarafından üretilen floresans ışın, diyagram b(2)'de-ki türler tarafından üretilen ışına göre yön ve faz yönünden farklıdır. Bu sebeple kendiliğinden emisyon *uyumlu olmayan* bir tek dalga boylu ışın oluşturur[18].

**Uyarılmış Emisyon:** Lazer mekanizmasının temelini oluşturan uyarılmış emisyon basamağı, Şekil 2.6(c)'de gösterilmiştir. Burada, uyarılmış lazer türleri tam olarak ayrı enerjili ( $E_y - E_x$ ) kendiliğinden emisyon fotonları ile çarpışırlar. Bu çarpışmalar sonucunda uyarılmış türler daha düşük enerjili hale dönerlerken, çarpan fotonlar ile eş enerjili fotonlar yayarlar. Eşdeğer oranda önemli olan diğer bir husus da, bu etkileşme sonucunda yayınlanan fotonların ayrı yönde ve *tam olarak* ayrı fazda hareket etmesidir. Bu sebeple de uyarılmış ışına, uyaran ışınlarla tamamıyla *uyumlu* yani eş fazlı olur.

**Soğurulma:** Uyarılmış emisyon ile rekabet eden soğurulma süreci Şekil2.6(d)'de gösterilmiştir. Burada gösterilen iki fotonun enerjisi ( $E_y - E_x$ ) değerine eşit olup diyagramda d(3) ile gösterilen yarı kararlı uyarılmış seviyeleri oluşturmak üzere her ikisi de absorplanır. Buradaki d(3) konumunun, a(3) diyagramında pompalama ile oluşan a(3) ile özdeşdir.

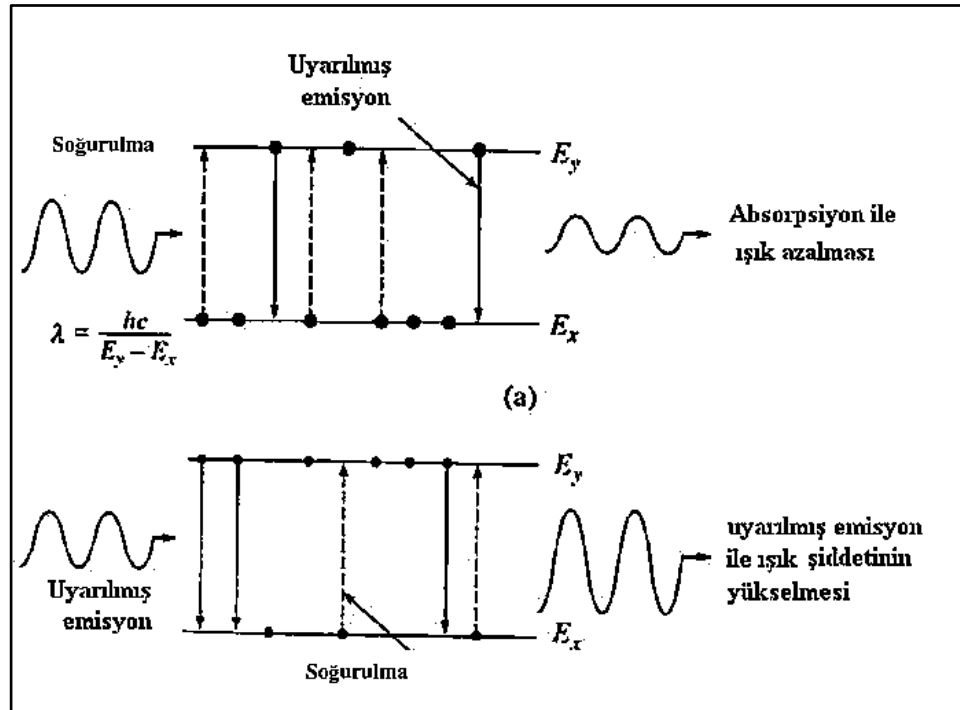


Şekil 2. 6. Lazer mekanizmasında dört önemli süreç: (a) pompalama (elektriksel, ışın veya kimyasal enerji ile uyarılması), (b) kendiliğinden emisyon, (c) uyarılmış emisyon ve (d) soğurulma

### 2.2.3. Birikim Artışı ve Işık Yükseltilmesi

Lazerlerde ışık yükseltilmesi için uyarılmış emisyon(salma) ile oluşan foton sayısının,soğurulma sonucu tüketilen foton sayısından büyük olması gerekir dolayısıyla uyarılmış durumda bulunan tanecik sayısının, düşük enerjili seviyede bulunanlardan daha büyük sayıda olacaktır. Bu birikim artışını elde edebilmek için normal enerji dağılımından pompalama işleminin yapılması gerekecektir.

Şekil 2.7’de iki farklı durum için oluşan zıtlığı sergilemektedir. Her iki durum için lazer ortamında bulunan dokuz molekülün durumu ele alınmıştır. Şekil 2.7(a)'da yani artışın olmadığı halde üç molekül uyarılmış durumda iken altısı daha düşük enerji düzeyindedir. Gelen üç foton absorplanınca üç uyarılmış molekül oluştururken, iki molekül de, bu uyarılma sırasında iki foton emisyonu yaparak temel enerji düzeyine dönerler. Bunun sonucunda toplam bir foton kaybı gözlenecektir. Şekil 2.7(b)'de ise, tersinirliğe uğramış sistemde uyarılmış emisyon ile soğurulmadan daha fazla enerji oluşuracaktır.



Şekil 2. 7. (a) Birikim artışı olmadığı ve (b) birikim artışı olduğu durumlarda ışın geçişi.

#### 2.2.4. Einstein Bağıntıları

Einstein uyarılmış soğurma, kendiliğinden salma ve uyarılmış salma işlerini tanımlayan parametrelerin, dengedeki bir sistem için ( $E_1$ 'den  $E_2$ 'ye) yukarı geçiş oranının,  $E_2$ 'den  $E_1$ 'e aşağı geçiş oranına eşit olduğunu gösterdi. Eğer birim hacim başına  $N_1$  tane atom  $E_1$  enerjili iseler bu durumda yukarı doğru geçiş veya soğurma oranı, hem  $N_1$  ve hem de bu frekansta bulunan foton sayısı  $N_2$  orantılı olacaktır. Şimdi  $\nu$  frekansındaki enerji yoğunluğu  $\rho_\nu = Nh\nu$  ile verilir. Burada  $N$ ,  $\nu$  frekansına sahip birim hacim başına foton sayısını gösterir. Böylece yukarı yönde geçiş oranını  $N_1\rho_\nu B_{12}$  olarak yazmamız mümkün olacaktır. Burada  $B_{12}$  bir sabittir. Benzer şekilde eğer  $E_2$  enerjili birim hacim başına  $N_2$  atom varsa 2.seviyeden 1.seviyeye oluşturulan geçiş oranı  $N_2\rho_\nu B_{21}$  olacaktır. Burada  $B_{21}$  yine bir sabittir. 2 nolu seviyeden 1 no'lu seviyeye kendiliğinden geçiş oranı basitçe  $N_2A_{21}$  olacaktır. Toplam aşağı geçiş oranı, indüklenen (oluşturulan) ve kendiliğinden oluşların katkılarıyla

$$N_2\rho_\nu B_{21} + N_2A_{21}$$

ile ifade edilebilir.  $A_{21}$ ,  $B_{21}$  ve  $B_{12}$  Einstein sabitleri olarak anılırlar. Aralarındaki bağıntılar aşağıdaki şekilde verilir.

Dengedeki bir sistem için yukarı ve aşağı yönde geçiş oranları eşit olmalıdır ve buradan

$$N_1\rho_\nu B_{12} = N_2\rho_\nu B_{21} + N_2A_{21} \quad (2.1)$$

ve böylece

$$\rho_\nu = \frac{A_{21}/B_{21}}{\frac{B_{12}}{B_{21}} \frac{N_1}{N_2} - 1} \quad (2.2)$$

yazarız. Buna ek olarak, ısı dengedeki bir sistemin değişik enerji seviyelerinin nüfusu Boltzmann istatistiksel dağılımı ile verilir:

$$N_j = \frac{g_j N_0 \exp(-E_j / kT)}{\sum g_i \exp(-E_i / kT)} \quad (2.3)$$

Burada  $N_j$ ,  $E_j$  enerji seviyesinin nüfus yoğunluğu,  $N_0$  toplam nüfus yoğunluğu ve  $g_j$  j'inci seviyenin dejenerasyonudur<sup>1</sup>. Böylece  $N_1/N_2$  oranı (denklem 2.4) ile  $\rho_v$  (denklem 2.2) eşitlikleri kullanılarak;

$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{g_1}{g_2} \exp[(E_2 - E_1) / kT] = \frac{g_1}{g_2} \exp(h\nu / kT) \quad (2.4)$$

$$\rho_v = \frac{A_{21} / B_{21}}{\left[ \frac{g_2}{g_1} \frac{B_{12}}{B_{21}} \exp(h\nu / kt) \right] - 1} \text{ elde edilir.} \quad (2.5)$$

$$\rho_v = \frac{8\pi h\nu^3}{c^3} \left( \frac{1}{[\exp(h\nu / kt)] - 1} \right) \quad (2.6)$$

(2.6) ve (2.7) karşılaştırılırsa

$$g_1 B_{12} = g_2 B_{21} \quad (2.7)$$

$$\text{ve} \quad \frac{A_{21}}{B_{21}} = \frac{8\pi h\nu^3}{c^3} \quad (2.8)$$

bağıntıları elde edilir.

Bu bağıntılara **Einstein bağıntıları** denir. İkinci ifade bize verilen bir enerji seviyesi çifti için kendiliğinden salma/uyarılmış salma oranını hesaplama şansını verir. Bu oranın

$$R = \frac{A_{21}}{\rho_v B_{21}} \quad (2.9)$$

<sup>1</sup>Genelde bütün mümkün hallerin veya enerji seviyelerinin doldurulma ihtimali aynı değildir. Bu olası durumlar  $g_j$  nüfus ihtimaline sahiptirler. Sıkça  $g_1/g_2$  oranı eşitliğinde 1'dir ve ihmal edilir.

ile verildiği görülebilir.

$$R = \exp(h\nu/kT) - 1 \quad \text{elde edilebilir.}$$

Bu ifadelerden uyarılmış salma işleminin kendiliğinden salma ve soğurma işlemi ile yarıştığını söyleyebiliriz. Dolayısıyla, eğer uyarılmış salma yoluyla bir ışık demetini şiddetlendirmek istersek, bu işlemi diğer ikisine göre nispi olarak arttırmamız gerekir. (2.10) eşitliği incelendiğinde verilen bir enerji seviyesi çifti için bu başarmanın  $N_2$  üst seviye nüfus yoğunluğunun  $N_1$  alt seviyesi nüfus yoğunluğuna göre artırılması ve  $N_2$  seviyesinin radyasyon yoğunluğunun da yükseltilmesi gerektiği sonucuna varılır. Aslında lazer olayını gerçekleştirmek için  $E_2 > E_1$  olsa bile  $N_2 > (g_2/g_1)N_1$  şartını yani “nüfus tersinmesi”nin gerçekleştirilmesi gerektiği anlaşılır[1].

### 2.2.5. Radyasyon Soğurulması

Bir soğurucu ortam boyunca geçen, birim yüzey kesit alanlı, mükemmel tek renkli radyasyonun düzgün bir yönlenmiş demetini ele alalım. Örneğin,  $E_1$  ve  $E_2$  enerji seviyeleri arasında yalnız bir tek elektron geçişinin varolduğu varsayıldığında demet şiddetindeki değişiklik uzaklığın bir fonksiyonu olarak gösterilecektir.

$$\Delta I(x) = I(x + \Delta x) - I(x)$$

Homojen bir ortamda  $\Delta I(x)$  hem alınan  $\Delta x$  mesafesine ve hem de  $I(x)$ 'e bağlıdır.

$\alpha$ : orantılılık sabiti **soğurma sabiti** ve (-) işareti ise soğurma nedeniyle demet şiddetindeki azalmayı temsil ettiği düşünüldüğünde ifade;

$\Delta I(x) = -\alpha I(x)$  şeklini alır. Bu ifadenin integrali alınırsa,  $I_0$  gelen demet şiddetini göstermek üzere;

$$I = I_0 \exp(-\alpha x) \quad (2.10)$$



Demetin soğurma derecesi  $E_1$  enerji seviyesindeki  $N_1$  atom sayısı ile  $E_2$  enerji seviyesindeki  $N_2$  atomlarının sayılarına bağlı olacaktır. Örneğin  $N_2$  sıfırda soğurma maksimum, tüm atomlar üst enerji seviyesindedir ise de soğurma sıfır ve uyarılmış salma maksimum olacaktır.

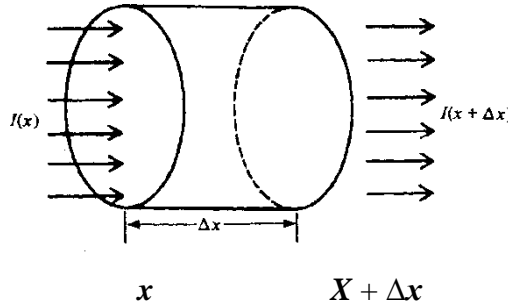
Şekil 2.8.'de  $\Delta x$  uzunluklu ve birim kesit yüzeyli bir hacmi geçen radyasyon geçişinden  $-dN/dt$  birim hacim başına foton kaybının net oranı

$$-\frac{dN}{dt} = N_1 \rho_v B_{12} - N_2 \rho_v B_{21} \text{ olacak veya bu ifade (2.15) ifadesinde yerine yazılırsa;}$$

$$-\frac{dN}{dt} = \left( \frac{g_2}{g_1} N_1 - N_2 \right) \rho_v B_{21} \quad (2.11)$$

olarak yazılabilir.

Kendiliğinden salınmanın yönlendirilmiş demet için her yönde olup, toplamda etkisinin sıfır olacağı yaklaşımla ihmal edileceği ve benzer şekilde saçılma kayıplarının da ihmal edileceğini anlamına gelmektedir.



**Şekil 2. 8.**  $\Delta x$  uzunluklu ve birim kesit yüzeyli bir hacmi geçen radyasyon

Demet şiddeti, birim zaman içinde birim yüzeyden geçen enerji olduğuna göre;

**- Demet şiddeti enerji yoğunluğu ile ortamdaki ışığın hızının çarpımına eşittir**  
( $I = \rho c / n$ ).

( $c$ : ışığın boşluktaki hızı,  $n$ : ortamın kırma indisi) dolayısıyla,

$\nu$  frekanslı fotonlar için enerji (radyasyon) yoğunluğu  $\rho_v = N h \nu$  olduğu için, demet şiddetinin  $I_v = \rho_v c / n = N h \nu c / n$  olacağı söylenebilir.

Böylece hacim elemanının  $x$  ile  $x+\Delta x$  sınırları arasında demet içindeki foton yoğunluğundaki değişme

$$-dN(x) = [I(x) - I(x + \Delta x)] \frac{n}{hv_{21}c} \text{ olarak yazılabilir. Eğer } \Delta x \text{ yeterince küçükse}$$

bunu;

$$-dN(x) = -\frac{dI(x)}{dx} \frac{\Delta x n}{hv_{21}c} \text{ olarak da yazabiliriz. Böylece bir } dt(=\Delta x/(c/n)) \text{ zaman}$$

$$\text{aralığında foton yoğunluğundaki düşme oranı } \frac{dN}{dt} = -\frac{dI(x)}{dx} \frac{1}{hv_{21}} \text{ ve } dI/dx \text{ i}$$

$I = I_0 \exp(-\alpha x)$  denkleminde yerine yazarsak,

$$\frac{dN}{dt} = -\alpha I(x) \frac{1}{hv_{21}} = \alpha \rho_v \frac{c}{n} \frac{1}{hv_{21}} \quad (2.12)$$

olarak bulunur.

$$\alpha = \left( \frac{g_2}{g_1} N_1 - N_2 \right) \frac{B_{21} h v_{21} n}{c} \quad (2.13)$$

elde edilir.

Bu eşitlik ile daha önce de varsaydığımız gibi  $\alpha$ 'nın  $E_1$  ve  $E_2$  enerji seviyelerindeki nüfus farkına bağlı olduğunu görürüz. Isıl denge durumunda bir atom grubu için  $E_2 > E_1$  olacağından  $(g_2/g_1)N_1$  daima  $N_2$  den (2.10 eşitliği) büyük olacaktır ve böylece  $\alpha$  pozitif olacaktır. Bununla birlikte eğer  $N_2$ 'nin  $(g_2/g_1)N_1$ 'den büyük olduğu bir hal oluşturulabilirse  $-\alpha x$ 'i pozitif yapacak şekilde (2.10 eşitliği)  $\alpha$ 'nın negatif olacağını görürüz. Böylece demetin şiddeti;

$$I = I_0 \exp(kx) \quad (2.14)$$

ifadesiyle uygun bir şekilde ortamda ilerledikçe büyüyecektir. Burada  $k$  küçük sinyal kazanç sabiti olarak bilinir ve

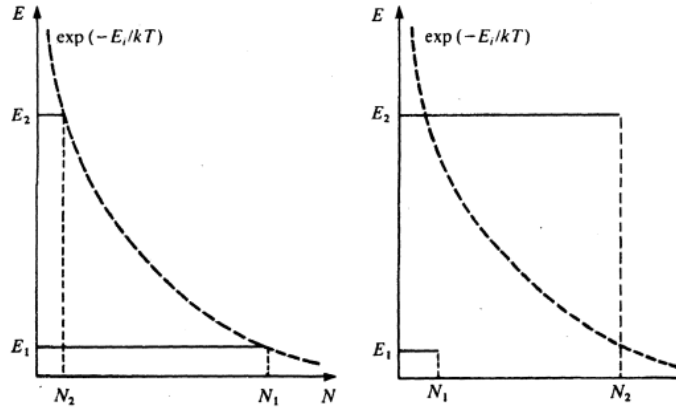
$$k = \left( N_2 - \frac{g_2}{g_1} N_1 \right) B_{21} \frac{h v_{21} n}{c} \quad (2.15)$$

ile ifade edilir.

## 2.2.6. Nüfus Tersinmesi

Işığın şiddetlendirilmesi için nüfus tersinmesi şartının sağlanması amacıyla atomik sistemin değişik enerji seviyeleri içinde bir denge dışı dağılım yaptırılır. Isıl dengedeki bir sisteme Şekil 2.9(a)'da gösterildiği gibi Boltzman(denklem 2.4) dağılımı uygulandığında  $N_j$  sabit bir sıcaklık için azalmaktadır. Eğer  $E_2 - E_1$  enerji farkı hemen hemen  $kT$ 'ye eşitse ( $=0.025$  eV,  $T=20^0C$ ) bu durumda üst seviyenin düşük seviyenin  $1/e$ 'sine veya 0.37 sine kadar olacaktır. Üst seviyeden alt seviyeye geçişte görünür bölge ışığı salacak durumdaki seviye nüfuslarını tahmin etmek için; ortalama görünür ışık dalga boyunu 550 nm alırsak 2.4. eşitliğinden nispi enerji nüfus miktarının dağılımı elde edilir.

$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{g_1}{g_2} \exp[(E_2 - E_1)/kT] = \frac{g_1}{g_2} \exp(h\nu/kT)$$
$$\frac{N_2}{N_1} = \exp - \frac{3,6 \cdot 10^{-19}}{1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 300} \cong e^{-87} \cong 10^{-37}$$

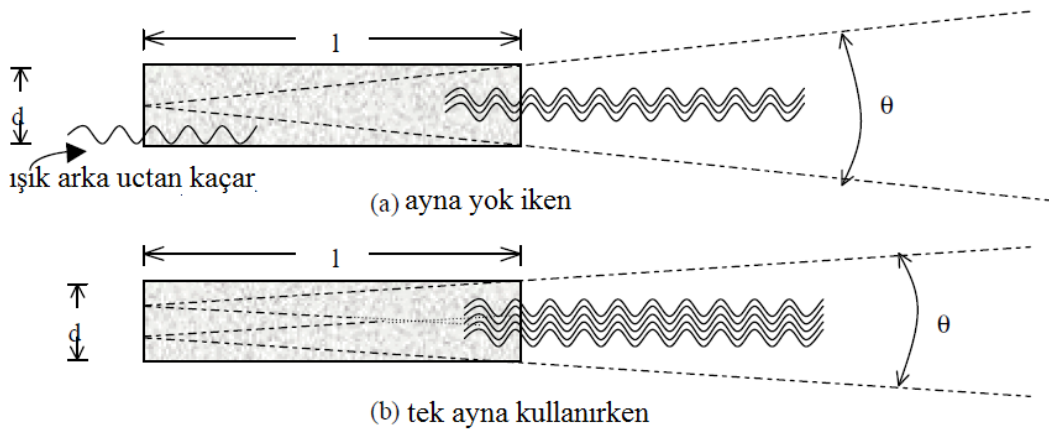


Şekil 2. 9. İki enerji seviyeli sistemin (a) ısıl denge ve (b) nüfus tersinmesi sonrası nüfusları

Şekil 2.9(b)'de nüfus tersinmesi için atomu,  $E_2$  enerjili seviyeye çıkarmak için büyükçe bir enerji atomları uyarda kullanılır. Bu uyarma işlemi ile nüfus tersinmesi gerçekleşir ve bu işlem "*pompolama*" olarak adlandırılır. Nüfus tersinmesi işlemi iki seviyeli sistemlerden çoküç veya dört seviyeli sistemlerde daha verimli şekilde elde edilebilmektedir.

## 2.2.7. Optik Geribesleme

Lazerde pozitif geri besleme, optiksel bir rezonatör oluşturacak şekilde bir çift aynanın arasına kazanç ortamının yerleştirilmesiyle elde edilir. Başlangıç ivmelendirmesi, salınan fotonun sistemin eksenini boyunca ilerlediği uygun enerji seviyeleri arasındaki herhangi bir kendiliğinden geçişle sağlanır. Sinyal ortam boyunca ilerlerken şiddetlendirilir (yükseltilir) ve aynalardan geri beslenir. Doyma, ortam tarafından sağlanan kazancın bir tam döngü sırasında oluşan kayıplarla eşitlenmesi durumunda elde edilir.



**Şekil 2. 10.** Uyarılmış emisyon ile lazer ışınının elde edilmesi

$d$  = çubuk çapı,  $l$  = çubuk (derinlik) uzunluğu,  $n$  = Lazer malzemenin kırılma indisi olmak üzere;

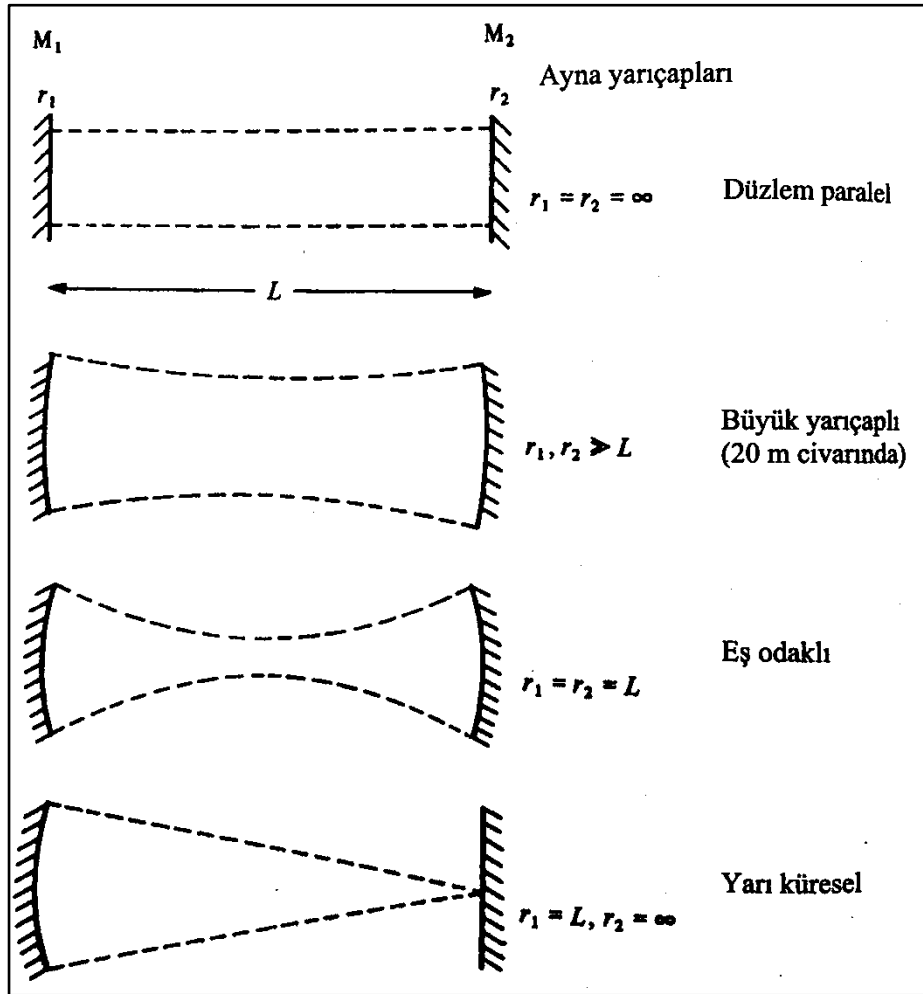
$$\text{Ayna kullanılmayan sistemde } \theta \text{ açısı; } \theta = \sin^{-1} \left( \frac{(d \times n)}{(2 \times l)} \right)$$

$$\text{Bir ayna kullanılan sistemde } \theta \text{ açısı; } \theta = \sin^{-1} \left( \frac{(d \times n)}{(4 \times l)} \right)$$

Lazer boşluğunda kullanılan optik, lazer ışınının dalga boyunu belirler. Birçok aktif ortamın birim uzunluk başına kazancı oldukça küçüktür ve bir döngüdeki ışık demeti çok küçük bir kazanç sağlar. Bununla birlikte, çoklu geçişlerde yükseltme oldukça fazladır. Burada rezonatör içindeki radyasyonun mükemmel doğrultulmuş bir demet halinde, iki düzlem paralel ayna arasında ileri-geri kat ettiğini varsaymamıza rağmen kırınım etkileri sebebiyle, sonlu boyda aynalarla mükemmel olarak düzeltilmiş bir demetin devamlı oluşumunu sağlamak mümkün olmaz. Bazı

radyasyonlar aynaların kenarının ötesine doğru yayılırlar. Bu yapının kırınım kayıpları, konkav aynalar kullanılarak giderilebilir. Pratikte çok sayıda ayna eğrilikleri ve şekillenimleri, kullanılan lazer tipine uyumlu olacak şekilde kullanılır.

Farklı ayna sistemlerinin ayrıntılı analizi kırınım teorisinin oldukça etraflı uygulanmasını gerektirmesine rağmen basit geometrik optik teknikleri kullanarak böyle bir analizin sonuçlarını kestirmek kolaydır. Bir ışık demetini içinde alıkoyan, başlangıçta eksenle küçük bir açı yapacak şekilde eğitilmiş ayna düzeneğinin rezonatör içinde kullanılmasının faydalı olacağı söylenebilir. Böyle rezonatörler *kararlı* olarak bilinirler.



Şekil 2. 11. Sıklıkla kullanılan lazer rezonatör ayna şekilleri (noktalı çizgiler mod hacminin genişliğini göstermektedir.)

Çokça kullanılan ayna düzenekleri Şekil 2.11’de gösterilmişlerdir. Hepsi kendine has olumlu ve olumsuz yanlara sahiptirler. Mesela düzlem paralel ayna, şekillenimi ayarlanması en zor olanıdır. Çünkü aynalar bu sistemde %100 paralel yapılamaz ve bu durumda optik demet birkaç turdan sonra sistemden ayrılır. Böyle rezonatörler yüksek kayıplara sahiptirler, fakat bazı faydalı özellikleri de taşırlar. Özellikle bunlar mod hacmini iyi bir şekilde kullanırlar. Kararsız rezonatörler yüksek kayba sahip olduklarından ancak yüksek kazançlı ortamlarda, mesala karbondioksit ortamında kullanılabilirler. Kazanç genelde düşük olduğundan, lazerde kayıpları minimumlaştırmak oldukça önemlidir. Kaybın bir kaynağı aynalardaki soğurmadır. Bunu azaltmak için aynalara yüksek mertebeli yansıtıcı ve çok katlı dielektrik kaplama yapılır(metalik kaplama yapılmaz).

Diğer yandan radyasyon demeti, demetin rezonatör içine odaklanamaması sebebiyle lazer ortamını maksimum bir şekilde kullanacaktır. (bu durumda geniş mod hacmi olduğu söylenir. Sonuçta aynalar  $\lambda/100$  şartını sağlayacak şekilde düzgünlükte olmalıdırlar. Düzlem paralel ayna durumuna zıt olarak, konfokal şekillenim ayarlaması daha kolay bir düzendir, fakat kullanılacak aktif ortam sınırlıdır (mod hacmi küçüktür). Gaz lazerlerinde, maksimum güç çıkışı isteniyorsa, büyük yarıçaplı rezonatör kullanılmaktadır. Eğer tek faz işlem(maksimum demet ahengi) isteniyorsa, bu durumda yarı küresel sistemi kullanılmaktadır.

Lazer titreşimlerinin gerçekleşebilmesi için tüm sistemin parametreleri cinsinden gerekli minimum pompalama gücünü (eşik şartı) türeteceğiz.

### **2.2.8. Eşik Şartları - Lazer Kayıpları**

Titreşimin kararlı bir hali, yükseltilme oranı kayıpları dengelediğinde elde edilebilir. Bu sürekli (CW) çıkışlı lazerler için geçerlidir ancak Bu durum atma(puls) lazerlerinde biraz farklıdır. Nüfus tersinmesi lazer oluşumu için gerekli bir şartken bu tek başına yeterli olmaz, çünkü kazanç sabitinin minimum değeri kayıpları yenmek ve titreşimin sürekliliğini sağlamak zorundadır. Bununla beraber eşik

kazancı,  $k$  küçük sinyal kazanç sabiti (2.16) eşitliğiyle, minimum gerekli nüfus terslenmesini belirler.

$k$  küçük sinyal kazanç sabiti;

$$k = (N_2 - \frac{g_2}{g_1} N_1) B_{21} \frac{h\nu_{21} n}{c} \quad (2.16)$$

Sistemdeki toplam kayıp çok farklı sayıda işlemde kaynaklanmaktadır;

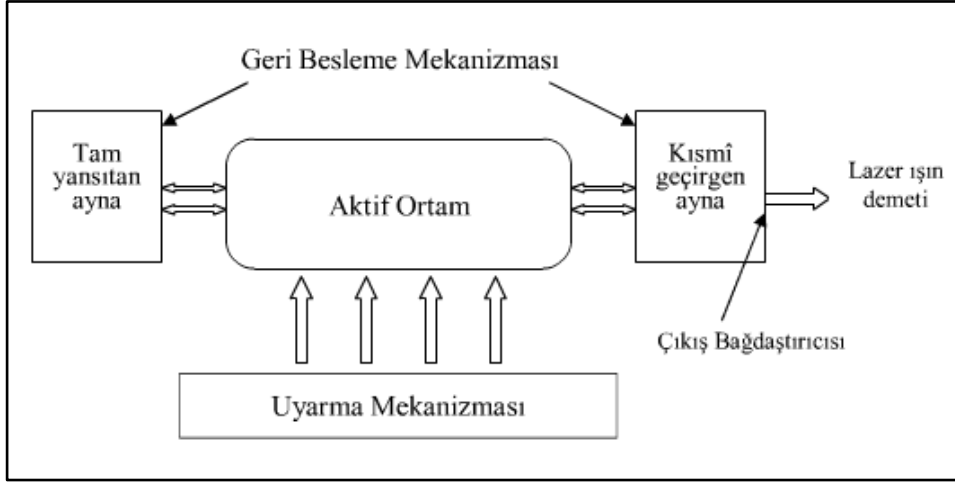
- 1-Aynalardaki geçirme faydalı çıkış için gereklidir, ancak diğer aynanın oldukça fazla yansıtkan olmaması,
- 2-Aynalardaki soğurma ve saçılma,
- 3-Arzu edilen geçişler dışındaki geçişler sebebiyle lazer ortamındaki soğurma (birçok lazer ortamında arzu edilen geçiş seviyeleri dışında lazere katkı sağlamayan çok sayıda enerji seviyesi vardır)
- 4-Lazer ortamında optik homojensizliklerden saçılma olması; bu özellikle katıhal lazerinde görülür,
- 5-Aynalardaki kırınım kayıpları.

### 2.2.9. Lazerlerin Bileşenleri

Lazer ışınının oluşabilmesi için;

1. Akif ortamın istenen elektromanyetik dağılım(spektrum) bölgesinde radyasyon yayması gerekmektedir.
2. Lazer ışınmasının oluşabilmesi için aktif lazer oluşturma ortamında bir tersinir birikim gerçekleşmelidir ve bu pompalama için lazer ışığı geçişiyle uyuşan uygun enerji seviyelerinin varlığını gerektirir.
3. En son olarak da doğru lazer titreşimi sağlamak için bir rezonant ortam sağlanmalıdır bu amaçla ortamın uçlarında geri besleme yapılmalıdır (ilk iki şartı

sağlamak lazer ışığı üretir, fakat lazeri oldukça kullanışlı yapan doğrultulmuş, tek renkli ışık demeti elde edilmesini sağlayamaz).



**Şekil 2. 12.** Tipik bir lazer kaynağının şematik gösterimleri

Şekil 2.12.'de tipik bir lazer kaynağının bileşenleri şematik olarak gösterilmiştir. Lazer sistemleri; pompalama sistemi, lazer aktif maddesini (katı, sıvı, gaz) içeren rezonans odası ve yansıtıcı aynalardan oluşur[12].Şekil 2.12.'de de gösterildiği gibi geri besleme işlemi, aktif materyalin her iki uç kısmına yerleştirilen yansıtıcı aynalar vasıtasıyla gerçekleştirilir. İki yansıtıcı ayna arasında bulunan aktif madde, aynalardan dik olarak yansıyan elektromanyetik dalgalar ile uyarılır. Paralel aynalar arasında ileri-geri yansıyan fotonlar, aynı frekansta ve aynı yönde olduklarından ışın şiddeti bu şekilde çığ gibi artar ve ışık frekansına eş bir frekanslı darbeler halinde oldukça parlak bir ışık huzmesi olarak yansır. Aktif materyalde yükseltelen fotonların bir ışın demeti olarak dışarı taşınabilmesi için aynalardan birisi kısmi geçirgen olarak yapılır.

Lazer çeşitlerinin belirlendiği yer olan lazer oluşturma ortamı(rezonans ortamı) lazer düzeneğin kalbi niteliğindedir.Lazer aktif maddesi yakut gibi katı (Nd-YAG-lazer, dalga boyu;  $\lambda = 1,06 \mu\text{m}$ ), galyum arsenür gibi bir yarı iletken, sıvı bir çözelti (renkli sıvı eriyik) veya argon, kripton gibi gaz( $\text{CO}_2$ -Lazer,  $\lambda = 10,6 \mu\text{m}$ , excimer-lazer,  $\lambda = 175\text{-}482 \text{ nm}$ ) fazında olabilir. Dış kaynaktan gelen ışın, elektrik akımı veya elektriksel boşalım ile lazer oluşturan madde aktiflenir veya pompalanır. Pompalanan



ışık maddenin atomlarını ivmelendirerek manyetik dalgalar halinde proton üretmesini sağlar, böylece pek çok fotondan oluşan bir sel oluşturulması sağlanır[1]. Lazer aktif ortamında güçlü bir ışık demetine dönüştürülerek çıkan lazer ışınları ayna, mercek sistemleri veya ışık kablosu (fiber optik kablo) yardımıyla istenilen yere iletilebilmektedir. Lazer ışınlarının iletimi lazer ışınının dalga boyuna göre değişmektedir; örneğin düşük dalga boyutlu Nd-YAG-lazer kaynağında ışın iletimi için ışın kablosu kullanılırken, CO<sub>2</sub>lazer kaynağında ise ayna sistemleri ile gerçekleştirilmektedir. Lazer ışının absorpsiyon veya yansıtma eğilimi dalga boyuna ve malzemeye göre değişmektedir.

Lazer tipleri, seçilen lazer aktif maddesine göre yakut lazeri, helyum-neon lazeri, karbondioksit-nitrojen lazeri, excimer lazeri, kripton lazeri, neodymium lazeri gibi isimler alırlar. Lazer aktif kaynak ortamının katı, sıvı veya gaz fazında olmasına göre de elde edilen ışının renkleri morötesi, yeşil, mavi, kırmızı veya kızılötesi gibi çeşitlilik gösterir[1].

### **2.2.10. Lazer Işığının Özellikleri**

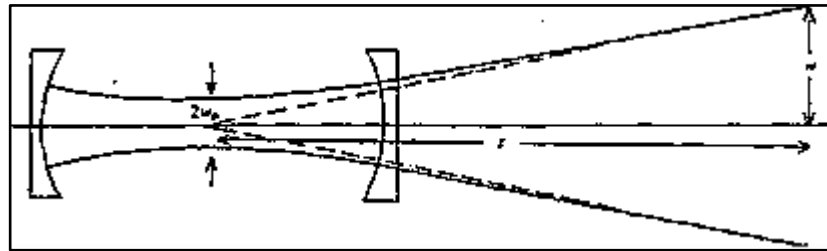
Tüm lazer ışığı çeşitleri aşağıda belirtilen özellikleri aynı derecede sağlamayacağından uygulama alanlarına göre lazer seçimi olanağı sınırlıdır. Lazer ışını normal ışık ile karşılaştırılarak aşağıdaki şekilde özellikleri belirtilmiştir:

- En büyük özelliği dağınık olmamasıdır; son derece düzgün bir ışıktır ve çok az saparlar ve bu sebeple yoğun bir şekilde hedefe yönlendirilebilirler. Kısa darbeler halinde yayılabildikleri için kayıpsız yüksek enerji nakli sağlanabilir. Lazer, kendisinde bulunan yüksek enerji sayesinde imalat endüstrisinde, kesme, kaynak ve delme işlerinde kullanılır.
- Ayrıca lazer ışınları, aynı fazda üretilen ışık dalgaları olduğu için şiddetleri büyüktür böylece küçük bir noktaya yüksek enerji verebilir ve böylece çok hassas ve büyük miktarda enerji gerektiren işler kısa sürede yapılabilir.

- Güneş ışığı yedi renkten, yani yedi ayrı dalga uzunluğundan oluştuğu ve bu dalgalar birbiri ile çakıştığı için her yana dağılır. Lazer ışığında ise bu yedi dalga uzunluğu tek bir dalga uzunluğuna indirilmiştir. Lazerin bu özellikleri odaklanarak kuvvetli ve tutarlı bir ışını verebilmesini sağlar[2].Lazer ışını tek dalga boyuna sahip olduğu için lazer cinsine göre çeşitli renkte ışınlar elde etmek mümkündür[11].
- Lazer ışını, dalga boyu tek olduğundan monokromatik özellik taşır. Frekans dağılım aralığı, frekansının bir milyonda biri civarındadır. Bu nedenle istenilen frekansta çok sayıda dalga, lazer dalgası üzerine bindirilmek suretiyle haberleşmede iyi bir sinyal jeneratörü olarak kullanılarak; aynı anda birçok bilgi bir yerden başka yere gönderilebilir.

#### 2.2.10.1. Yönlenebilirlik

Lazerlerin en önemli özelliği yönlendirilebilir olmasıdır. Doğal ışın her yöne yayılırken, lazer ışınları oldukça uzun bir mesafeyi sabit genişlikte bir ışın demeti olarak aldıktan sonra genişlemeye başlar. Lazerlerin demet dağılma açısının çok küçük olması sebebiyle lazer kaynağından çok uzakta bile bu ışığın toplanması mümkündür. Böylece; lazer demeti tarafından taşınan enerji kolaylıkla toplanıp, küçük bir alana odaklanabilir. Uzun iletişimlerde lazer ışınlarının bazı ayarları yapılarak ışının 1 km uzağa gönderilebilmesi bu özellik sayesinde sağlanır. Bu lazer ışınlarının tehlikeli bir özelliğidir.



Şekil 2. 13. Lazer rezonatorü dışında bir lazer demetinin dağılması.

Demetin dağılma mesafesi kırınım ile sınırlanır. Kırınım limitinde radyan cinsinden dağılma açısı  $\theta$  ile verilir. Burada

$$\theta = \kappa \frac{\lambda}{D} \quad (2.17)$$

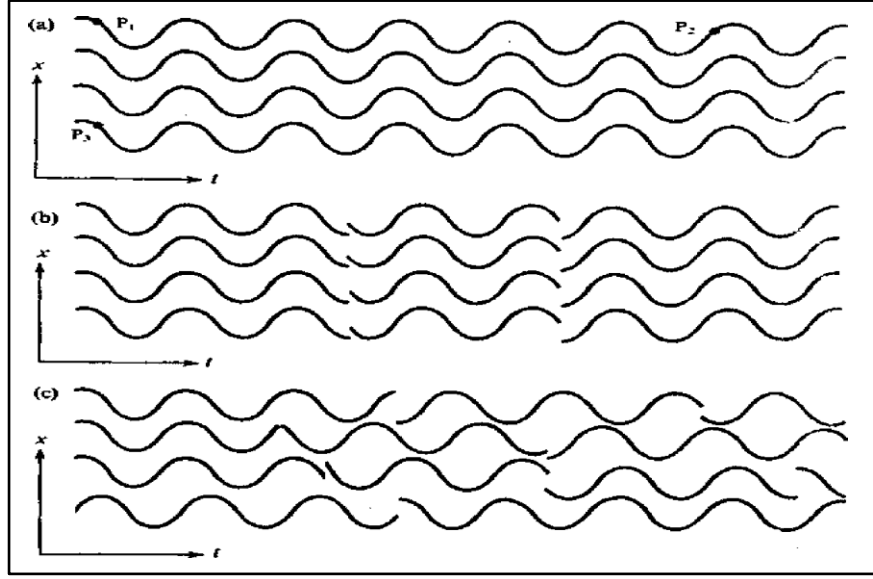
$D$  demetin açığa çıktığı deliğin çapıdır ve  $K$  bir mertebesinde bir sayısal faktördür.  $K$  'nın kesin değeri demetin doğasına bağlıdır (Şekil 2.13.). Çizelge 2.3.'te bazı tipik demet dağılma açıları verilmektedir. Demet dağılması artan çıkış gücü ve mod içeriğiyle artma eğilimindedir.

**Çizelge 2. 3.** Tipik lazer demeti dağılma açıları

Lazer	He-Ne	Ar	CO2	Yakut	Nd:cam	Boya	GaAs
Demet dağılması(mrad)	0,5	0,8	2	5	5	2	20x200

### 2.2.10.2. Demet Ahengi

Uyarılmış salmanın en önemli karakteristik özelliği, uyarılmış dalganın uyarıcı dalga ile aynı fazda olmasıdır; yani iki dalganın elektriksel alanının uzay ve zamansal değişimi aynıdır. Böyle bir demet mükemmel *uzaysal ahenge* sahiptir. Diğer ilgili özellik *zamansal ahentir*. Bu, zamanın fonksiyonu olarak aynı yerdeki elektrik alanının nispi faz bağıntısına karşılık gelir. Eğer faz zamanla sabit bir şekilde değişirse bu durumda demetin mükemmel zaman ahenkli olduğu söylenir. Bu fikirler Şekil 2.14.'te ifade edilmiştir[1].



**Şekil 2. 14.** Ahengin gösterilmesi

Şekil 2.14(a)'da mükemmel ahenkli bir demet gösterilmektedir. Dalgaların bütün bileşenleri her zaman aynı fazdadırlar. Şekil 2.14(b)'de uzaysal ahenge sahip fakat nispi zamansal ahenk gösteren bir demet çizilmiştir; dalgaların fazları aynı anda her birkaç titreşimde özdeş miktarda değiştirmeleri sebebiyle oluşur. Şekil 2.14(c)'de her bir dalga fazının rasgele zamanlarda rasgele değiştiği hemen hemen hiç ahenkli olmayan demet gösterilmiştir.

Ahenk zamanı ( $t_c$ ) böylece kaynağın bir  $L_c$  boylu dalga treni salması için alınan zaman olarak tanımlanabilir. Bu durumda

$$t_c = L_c / c \quad (2.18)$$

yazabiliriz. Burada  $c$  ışık hızıdır. Gerçekte ahenk zamanı alınan çizgi genişliğiyle bağlantılıdır.

$$t_c = 1 / \Delta \nu \quad (2.19)$$

Demet ahengi, lazer demetinin parçalara ayrılarak kullanıldığı uygulamalarda; ışığın parçalara ayrılarak farklı mesafeleri kat edecek şekilde biçimlendirildiği holografik görüntü işleme sistemlerinde kullanılabilir.

**Çizelge 2. 4.** Sık kullanılan lazerlerin ahenk mesafeleri.

Lazer türü	Mod çeşidi	Dalga Boyu
He-Ne	tek enine, tek boyuna modlu	1000m'ye kadar
He-Ne	çok modlu	0.1-0.2 m
Argon	çok modlu	0.02m
Nd:YAG		10-2m
Nd:cam		2x10-4m
GaAs		1x10-3m
Yakut		10m<x<30m

### 2.2.10.3. Parlaklık

Lazer radyasyonunun en önemli karakteristiği diğer ışık kaynaklarından daha yüksek parlaklığa sahip olmalarıdır. Parlaklığın artması paralellik ve ayarlamalarla ortaya çıkar. Yüksek parlaklık lazerin küçük noktalara odaklanmasından kaynaklanır.Lazerin parlaklık özelliği ışık kaynaklarından oluşur.Parlaklığı birim katı aç ve birim alan başına yayınlanan güç olarak tanımlıyoruz (bazen '*öz parlaklık*' terimi, yani birim dalga boyu aralığı başına parlaklık,  $Wm^{-2} sr^{-1} \Delta\lambda^{-1}$  kullanılır).

### 2.2.10.4. Lazer Radyasyonunun Odaklama Özellikleri

Lazer demetinin odaklanabilme hassasiyeti kırınımıyla belirlenir. Tekli bir mod demeti ışığın dalga boyu mertebesinde boyutlarına odaklanabilir. Pratikte optik sistemdeki bozukluklar bunu bu mertebede gerçekleştirmenin hemen hemen imkansız olduğunu söyler. Odaklanacak nokta boyutu tahmini, f odak mesafeli bir lensin odak düzlemindeki  $r_s$  yarıçapı ile

$$r_s = f\theta \quad (2.20)$$

ifadesiyle verilir. Burada  $\theta$  radyan cinsinden demetin dağılma açısıdır.  $\theta$  yaklaşık olarak  $\lambda/D$  ile verildiğinden (D delik çapı)

$$r_s \cong f \frac{\lambda}{D} \cong \lambda F \quad (2.21)$$

ifadesine sahip oluruz (demetin lensi kapladığını varsayarak). Buradaki F lensin F sayısıdır.

Belirli uygulamalarda, mesela elektronik malzemelerin mikro işleminde, iyi odaklama gereklidir ve böylece biz kısa odak mesafeli lens kullanmayı arzu ederiz. Lazer radyasyonunun odaklayıcı özellikleri ile, süpermarketlerde barkod uygulaması ve ev video kasetleri, cd sistemlerinin hazırlanma ve okunması gerçekleştirilebilmektedir.

#### **2.2.10.5. Ayarlanabilirlik**

Bazı lazerler belirli dalga boylarında lazer ışığı salacak şekilde ayarlanabilir; örneğin, boya lazerleriyle ayarlanabilirlik oldukça fazla olabilir. Esasında boya lazerleri görünür bölgenin çoğunu kapsar ve harmonik üretimiyle de bu aralık UV(Ultraviyole) bölgeye uzatılabilir.

## 2.2.11. Lazer Çeşitleri

Kullanılan aktif ortamın fiziksel doğasına bağlı olarak lazerleri, yalıtkan lazerler, yarıiletken lazerler, gaz ve boya lazerleri olmak üzere dört gruba ayırabiliriz[1].

- **Katı Hal Lazerleri**
  - **Zenginleştirilmiş Yalıtkan Lazerler (Nd:cam lazeri)**
  - **Yarı İletken Lazerleri (GaAs lazeri)-Yüksek güç verimine sahiptirler.**
  - Çok Eklemlili Lazerler
  - Kuantum Çukuru Lazerleri
- **Gaz Lazerleri (en geniş kullanım alanına sahiptir.)**
  - Atom Lazeri-He-Ne Lazeri
  - İyon Lazerleri-Argon Lazeri
  - Molekül Lazerleri-CO<sub>2</sub> Lazeri
- **Sıvı Boya Lazerleri**

### 2.2.11.1. Katı Hal Lazerleri

Aktif ortam olarak yakut kristalinin kullanıldığı katı hal lazer çeşidi halen yaygın uygulama alanına sahip olan üç seviyeli düzenek olmakla birlikte Nd:YAG(Neodymium katkılı Yttrium Aluminium Garnet) lazeri, katı hal lazerleri arasında en fazla kullanılanıdır. Nd:YAG lazeri dört- seviyeli lazer olarak daha kolay birikim artışı sağladığından yakut lazere göre üstünlük getirir. Nd:YAG lazerin dalga boyu 1064 nm'de çok kuvvetli bir ışın verir ve bu ışının frekansı ikiye katlanarak 532 nm'de keskin bir çizgi elde edilebilir[1].

### Zenginleştirilmiş yalıtkan lazerler

Zenginleştirilmiş yalıtkan lazeri terimi,genelde kristal formundaki bir atom dizisini içeren aktif ortama sahip bir lazeri tarif etmede kullanılmakla birliktebu ortamın oluşturulması, saflaştırma sırasında ortama bilerek konulmuş safsızlık atomlarıyla

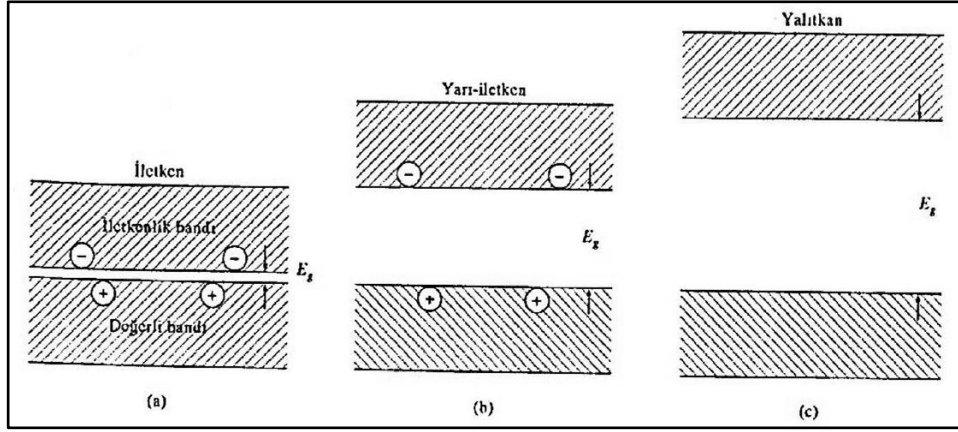
sağlanır. Böyle lazerler dayanıklıdır, bakımları kolay ve yüksek pik güçleri üretmeye meyillidirler. Tipik örnek olarak yakut ve Nd:YAG lazerleri gösterilebilir. İlk yapılan lazer olması sebebi ile yakut (ruby) lazeri ilginç olmakla beraber, Nd:YAG lazeri günümüzde *çok* daha fazlaca kullanılmaktadır.

### **Yarı İletken Diyod Lazerler**

Lazer diyodları modern yarı iletken teknolojisinin ürünleridir; tek dalga boylu ışına çok yakın ışınlar yayan önemli yeni bir ışın kaynağıdır.

Optoelektronikte ve haberleşmede daha çok yarıiletken GaA/As lazerler kullanılır. Bu lazerler daha az enerjiyle sürülebilir. Diğer yandan hafif ve küçük hacimlidirler. Ayrıca darbe akımı ile etkin olarak doğrudan modüle edilebilirler. Burada bir maddenin yarı iletken veya yalıtkan olmasının sadece aralık band-enerjisine bağlı olmadığına aynı zamanda malzemenin uyarılma enerjisine ve çalışma sıcaklığına bağlı olduğuna ve bunun da malzemeye uygulanan potansiyele bağlı olacağı açığa çıkmaktadır. Çalışma mekanizması Şekil 2.15.'te verilen, dıştaki boş orbitaller örtüşerek *değerlik bandından* daha yüksek enerjideki *iletkenlik bandını* oluşturur. İletkenlik ve değerlik bandları arasındaki enerji farkı  $E_g$  band aralık enerjisidir. İletkenlerde bu enerji çok küçük bir değerde olduğundan (Şekil 2.15a.) değerlik bandında bulunan elektronlar küçük bir termal enerji olarak iletkenlik bandına geçerler ve bunun sonucunda da iletkenlik için gerekli elektron hareketi sağlanır. Bunun tersi bir durum olan yalıtkanlarda bağl olarak daha büyük band-aralık enerjisi görülmesi sonucunda, değerlik bandındaki elektronlar termal yolla iletkenlik bandına geçemeyecek ve bunun sonucunda da elektriği iletmemeyecektir (Şekil 2.15c.). Silisyum veya Germanyum gibi yarı iletkenlerde band-aralık enerjisi fazla büyük bir değerde olmayıp iletkenlik özellikleri, iletken ve yalıtkanlar arasında yer alacaktır (Şekil 2.15b.).



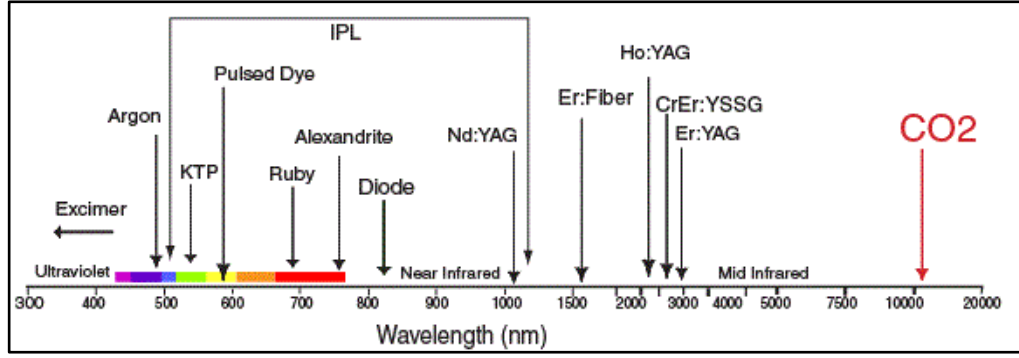


**Şekil 2. 15.** Üç değişik malzeme türündeki değerlik ve iletkenlik bandları

Bir yarı iletken diyoda boylamasına bir potansiyel uygulandığında, elektronlar iletkenlik bandına uyarılıp elektron-boşluk çiftleri oluşur ve diyod elektriği iletir. Sonunda bazı elektronlar durulup değerlik bandına geri dönerler, bu durumda da aralık enerjisine eşit enerjili ( $E_g = h\nu$ ) foton yayımı gerçekleşir. Bu şekilde elektromanyetik ışınlarla açığa çıkan fotonların frekansı  $\nu = E_g/h$  ile verilebilir. Işık oluşumunu artırmak amacıyla üretilen bu düzenekler *ışık-yayan diyodlar* veya LED olarak tanınırlar.

Lazer diyodları darbe(puls) veya sürekli modlarında (CW) uygulanması, çok çeşitli uygulama alanları bulmalarına neden olmaktadır. Lazer diyodlarının hızlı gelişimleri onların kompakt-disk çalıştırıcılarında ışık kaynağı olarak kullanımları ile sonuçlanmıştır.

CD-ROM sürücülerinde, çizgi-kod tarayıcılarında ve benzer optoelektronik cihazlarda lazer diyodları çok yararlı kullanım alanları bulmuştur.



**Şekil 2. 16.** Lazer çeşitlerinin Dalgaboylarına Göre Gösterimi

Karbondioksit, Nd: YAG(Neodymium katkılı Yttrium Aluminium Garnet), Holmium: YAG, Erbium: YAG, oftalmik Diyot Lazerler spektrumun kızılötesi bölgesinde; Excimer lazerler de morötesinde ışık verirler. Görünen spektrumda sadece Argon, Dye, Krypton ve nispeten zararsız Helium- Neon lazerler yer almaktadır.

### 2.2.11.2. Gaz Lazerler

Ticari amaçla değişik amaçlar için çok sayıda gaz lazerler üretilmiştir. Bu düzenekler dört tiptir: (1) He/Ne gibi nötral atom lazerleri; (2) aktif türleri Ar<sup>+</sup> veya Kr<sup>+</sup> olan iyon lazerler; (3) lazer ortamı olarak CO<sub>2</sub> veya N<sub>2</sub>'yi kullanan molekül lazerler; (4) excimer lazerler.

Helyum/Neon lazerleri; bütün lazerler arasında çok düşük maliyet ve bakım masrafları, büyük güvenilirlik ve düşük güç tüketimi sebebiyle en yaygın lazer tipidir. En önemli çıkış çizgisi 632,8 nm'dedir. Bu lazer puls modundan ziyade sürekli modda kullanılır.

Argon iyon lazerleri; yeşil (514,5 nm) ve mavi (488,0 nm) bölgede keskin çizgiler verir.

Morötesinde (UV) ve görünür bölgede salma yapan iki molekül lazeri geliştirilmiştir. Bunlar azot ve excimer lazerleridir;

N<sub>2</sub> lazerleri; pompalama işlemleri yüksek potansiyelli kıvılcım kaynağı ile oluşturulduğu için puls modunda çalışan 337,1 nm de keskin bir çizgi verir.

CO<sub>2</sub> gaz lazerleri 10,6 µm'deki tek dalga boylu infrared ışınların elde edilmesinde kullanılmaktadır.CO<sub>2</sub>lazeri, Azot lazerinden oldukça farklıdır. CO<sub>2</sub> lazerinde geçişler molekül dönme/titreşme enerji seviyeleri arasında gerçekleşirken, azotta lazer geçişleri elektronik enerji seviyeleri arasındadır. Azotta kazanç o kadar yüksektir ki tek bir yükseltici olarak kullanılabilir; yani birçok uygulamada geri besleme gereksizdir (bu tip yüksek kazanç *süper yayıcılık* olarak ifade edilir). Ticari azot lazerleri 10 kW'luk pik güçlü atmalar üretebilirler.

Azotun tersine excimer lazerler bir yarı kararlı uyarılmış hal sağlarlar. Excimer lazerler, Helyum, Flor ile Argon, Kripton veya Ksenon gazlarından birinin karışımını içerir. Asal gaz elektriksel yolla elektronik geçişleri sağlanacak şekilde uyarılır ve bu konumda da Flor gazı ile reaksiyona sokularak ArF, KrF veya XeF gibi uyarılmış iyonlar oluşturur ki, bunlar sadece uyarılmış hallerde kararlı olduğu içinEXCIted diMER kelimelerinden türetilmiş *excimer* olarak anılırlar.Excimer lazerler ultraviyole bölgede yüksek enerjili pulsalar oluştururlar (XeF için 351 nm, KrF için 248 nm ve ArF için de 193 nm)[14].

### **2.2.11.3. Sıvı Boya Lazerleri**

Katıların, optik homojenliği sağlama alınarak hazırlanmaları zordur ve eğer fazla ısıtılırlarsa, kolayca kalıcı hasar meydana gelebilmektedir. Gazlarda ise bu problemler yoktur, fakat aktif atom yoğunluğu oldukça azdır.Sıvılarda ise, belli dalga boylarında ayarlanabilmeleri (tuning) sebebiyle hem katı ve hem de gazlara göreavantaja sahiptirler; Birçok farklı sıvı lazerleri geliştirilmiştir. Bunların en önemlileri boya (dye) lazerleridir. Aktif ortamı, çözücüde çözülmüş organik bir boyadır.



### 2.2.12.1. Aksenal Modlar

Lazerin iki aynası bir rezonant boşluk oluşturur ve duran dalga şekli, tıpkı bir yay ve orgçubuğunda olduğu gibi, aynalar arasında oluşur. Duran dalgalar

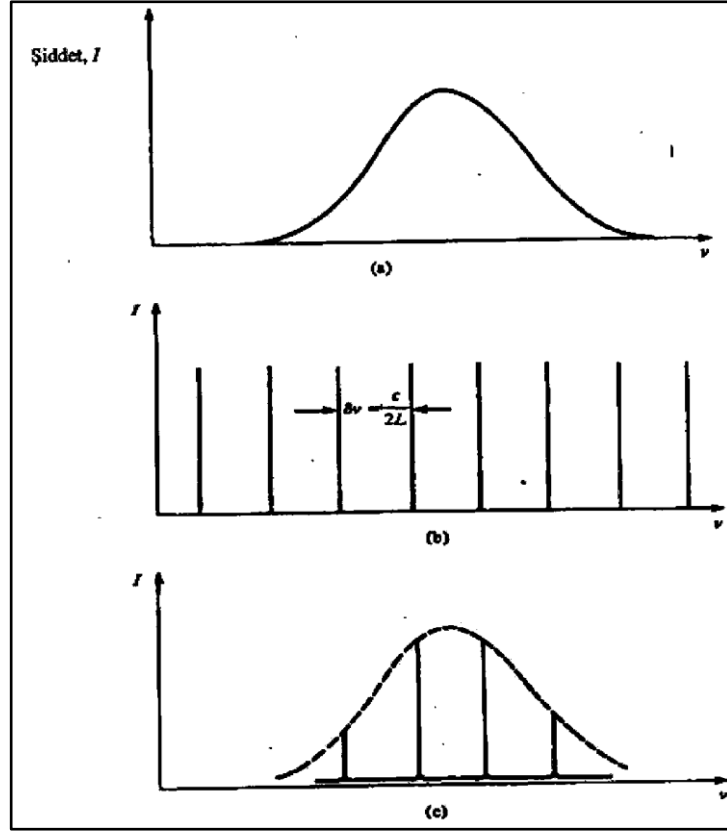
$$p \frac{\lambda}{2} = L \text{ veya } v = \frac{pc}{2L} \quad (2.22)$$

şartını sağlarlar. Burada  $L$  aynalar arasındaki optik yolu,  $\lambda$  boşluktaki dalga boyunu göstermek üzere  $p$  bir tamsayıdır ve  $L = 0.5$  m ve  $X = 500$  nm için  $p \cong 2 \times 10^6$  gibi oldukça yüksek bir değeri olarak aksenal veya boyuna rezonatör modu tanımlar.

$p$  çok yüksek değerleri alabildiğinden dalga boyundaki çok küçük değişiklikler için  $p$ 'nin çok farklı değerleri oluşabilir. (2.22) eşitliğini sağlayan  $p$ 'nin her değeri, birbirine bitişik modlar ( $\delta p = 1$ ) arasındaki  $\delta v$  frekans aralığı

$$\delta v = \frac{c}{2L} \quad (2.23)$$

ile verilir ve böylece  $L = 0.5$  m için  $\delta v = 300$  MHz'dir. (denklem 2.23)  $p$ 'den bağımsız olduğu için birbirine yakın modların frekans aralığı kendi frekanslarına bakmaksızın aynıdır. Lazer rezonatörünün titreşim modları böylece Şekil 2.19(b) şeklinde gösterildiği gibi  $c/2L$  ile birbirinden ayrılmış, her biri (2.22) eşitliği ile verilen çok sayıda frekansları içerecektir.



**Şekil 2. 19.** (a) Genişletilmiş lazer geçiş çizgisi; (b) rezonatör modları (c) lazer çıkışındaki aksenal modlar.

Eksenal modların her biri lazer çıkışında tek bir noktaya katkıda bulunur. Enine modlar ise çok sayıda noktanın çıkış şeklinde görünmesini sağlayabilir[1].

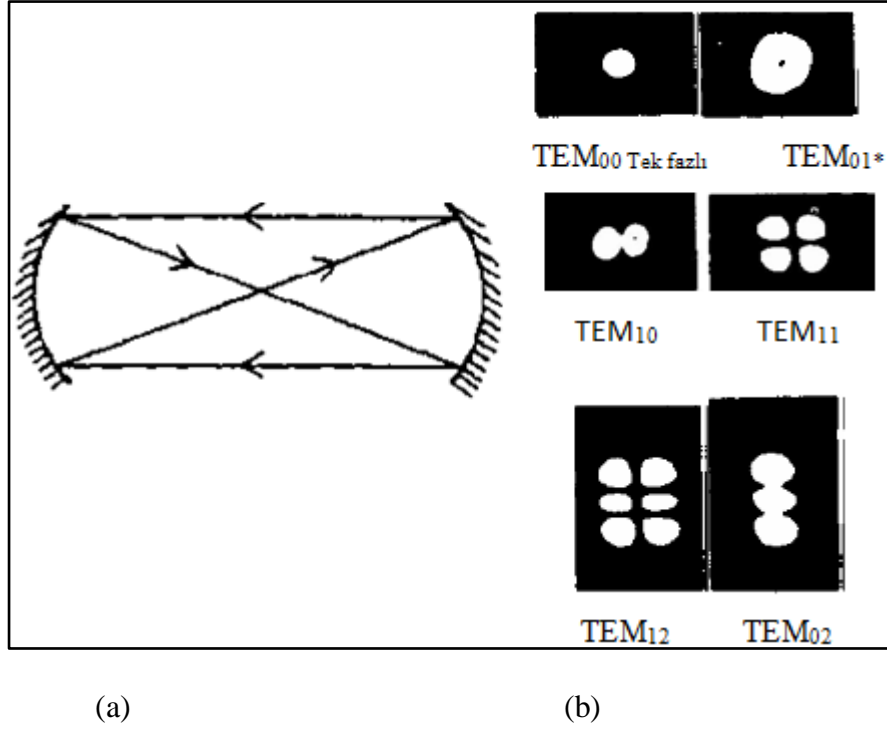
### 2.2.12.2. Enine Modlar

Eksenal modlar Şekil 2.20(a)'da gösterildiği gibi aynaların merkezlerini birleştiren bir çizgi üzerinde lazer rezonatörü boyunca aksenal olarak hareket eden düzlem dalgalar tarafından oluşturulur. Bu kapalı yolu kapsadıktan sonra kendini tekrarlayan dalgalar rezonant modların sayısını arttıracaklardır; fakat ilerleme yönünün dik doğrultusunda bulunan elektromanyetik alanların bileşenlerine sahip olduklarından, enine elektromanyetik(TEM) modlar olarak ifade edilirler.  $q$  demet yatay tarandığındaki minimum sayıyı ve  $r$  ise dikey tarandığı sayı ile karakterize edilirler. Böylece Şekil 2.20(b)'de gösterildiği gibi  $TEM_{00}$ ,  $TEM_{01}$ ,  $TEM_n$  gibi modlara sahip oluruz.

Bir  $TEM_{00}$  modunda demet boyunca şiddet dağılımı gerçekte Gausyendir ve böylece elektrik alan değişimini;

$$E(x,y) = E_0 \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{w^2}\right) \quad (2.24)$$

olarak yazabiliriz. Burada  $x$  ve  $y$ ,  $z$  yönü boyunca alınan lazer eksenine dik yönlerdir. Demetin yan taraflara doğru dağılımı  $z$  mesafesinin bir fonksiyonu olan  $w$  parametresinin değerine bağlı olarak belirlenir.  $x^2 + y^2 > w^2$  olduğunda, alan lazer ekseninden uzakta mesafeyle çok çabuk azalır.  $w$ 'nin değeri alan genişliğinin maksimum değerinin  $(w^2 = x^2 + y^2) 1/e$  'sine düştüğü noktanın odak yarı çapıyla hesaplanır.



**Şekil 2. 20.** (a) Enine modların oluşmasına sebep olan eksenele olmayacak şekilde kendini tekrarlayan ışın örneği (b) q ve r lazer demeti yatay ve dikey olarak tarandığında minimumların sayısını gösterirler. TEM<sub>01</sub>\* modu TEM<sub>01</sub> ve TEM<sub>10</sub> modlarının bir kombinasyodur.

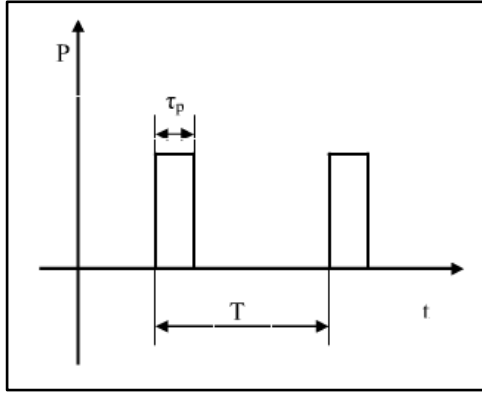
### 2.2.13. Lazer Çıkışının İyileştirilme Yöntemleri

Lazer çıkışı her zaman tamamen ahenkli ve tek renkli radyasyon içermemektedir. Örneğin, çıkış sürekli veya bir atma içinde karşılıklı ahenkli olmayan pikler şeklinde olabilir ve birbirinden nispeten farklı enine ve boyuna bir çok modlardan oluşabilir. Lazerin uygulamaları ele alındığında böyle karakteristiklerin oldukça kabul edilebilir olduğunu, fakat bununla beraber, lazer çıkışının özel bazı uygulamalar için uygunluk sağlaması amacıyla geliştirilmesi gerektiği ortaya çıkmaktadır. Çıkıştaki yapılacak bazı iyileştirmeler oldukça basitçe başarılabilir; örneğin argon iyon lazerinde bir prizma veya ızgaranın optik rezonatöre konulmasıyla üretilen dalga boylarından bir tanesi seçilebilir. Pratikte kolaylıkla başarılabilen lazer çıkışın diğer iyileştirmeleri, **modlar, tersinir birikim, eşik kazancı** ve benzeri olgular ile gerçekleştirilebilir[1].

### 2.2.14. Lazerlerde Güç ve Enerji

Demeti oluşturan ışık tayfının yoğunluğunu değerlendirebilmek için enerji kavramı kullanılmaktadır. Lazer enerjisi joule ile ölçülür. Işık tayfını sürekli olarak üreten lazerlere sürekli dalga (Continuous Wave, CW) modunda çalışan lazerler, ışık tayfını periyodik darbeler şeklinde üreten lazerlere ise (Pulse Repetition Rate Mode, PRRM) tekrarlanan darbeler modunda çalışan lazerler denir. Şekil 2.21.'de lazer darbeleri ve darbe süresi gösterilmiştir. Burada T: Darbe periyodu,  $t_s$ : darbe süresidir. Sürekli dalga lazerlerinde ölçülen güç, ortalama güçtür. Darbeli lazerlerde ise güç, ortalama güç ve tepe gücü olarak ikiye ayrılır. Ortalama güç T periyodunda, tepe gücü ise  $t_s$  süresince ölçülür.





**Şekil 2. 211.** Lazer güç darbeleri

Demetteki mod sayısının karmaşık oluşu ve demet dağılımının büyüklüğü güç yoğunluğunu küçültür.

Zenginleştirilmiş yarı iletken lazerler yüksek güç üretmeleri sebebiyle kolaylıkla çok yüksek ışına üretebilirler. Böyle yüksek ışına şiddetleri lazerlerin delme, kesme, kaynak yapma ve birçok farklı malzemede ısıl işlemlerde kullanılmasına öncülük eder.

### **2.2.15. Lazer Işınının Uygulama Alanları**

Lazer ışınının bahsedilen özelliklerden dolayı, teknolojinin hemen hemen bütün alanlarında uygulama imkanı mevcuttur. Halen en çok araştırma yapılan konulardan birisi lazer olduğu için uygulama alanı en yaygın sahalardan bazı örnekler verilecektir[14].

a. Tıp: Lazer enerjisi doku veya organ üzerine verildiğinde enerjinin bir kısmı yansır veya dağılır. Diğer bir kısmı da ya emilir ya iletilir. Enerjinin etkisi; dalgaboyuna, güç yoğunluğuna, uygulama süresine, zamana bağlı karakteristiklerine ve dokunun özelliklerine sıkı sıkıya bağlı olmak üzere göz, diş, deri ve diğer tüm ameliyatlarda kullanılabilir.

b. Kimya: Yoğun lazer ışığı, gayet yüksek seçici özelliği olan bir katalizör olup, çok küçük bölgelerdeki kimyasal bağların çözümlenmesine neden olabilir. Kimyasal analizlerde spektografi ile, bileşik cisimlerin çok hassas analizi ve molekül yapılarının etüdü yapılabilmektedir.

c. Uzay: Amerika'nın uzay savunma sisteminin temeli, lazerin düşman roketlerini havada imhasına dayanmaktadır.

d. Haberleşme: Lazer her türlü haberleşmede, klasik yöntemlerden çok daha fazla kanal sayısı elde etme imkanı verdiği için, özellikle optik fiberlerde, ışık kaynağı olarak kullanılarak optik iletişimin temel ögesini oluşturmaktadır. Optik fiberlerin en önemli özelliği, inanılmaz derecede yüksek kapasiteleridir. Elektrik sinyalleri fiber iletişimi için ışık dalgalarına çevrildiklerinden, dinlenilmelerine imkan yoktur. Fiberler aynı zamanda, her türlü parazit etkisinden muaftırlar. Yarıiletken lazerlerde bir tek optik fiber üzerinden, binlerce telefon konuşması ve bilgi iletişimi, çok hızlı bir şekilde yapılabilmekte ve kontrol edilebilmektedir.

e. Endüstri: Lazer ışını özelliklerinden dolayı; delik açmada, kaynaklarda vb. alanlarda kullanılabilir. Matbaalarda, teyp ve video kayıtlarında, yüksek gerilimdeki akımların veya arabaların hızlarının uzaktan ölçülmesi ve atmosferdeki kirlilik derecesinin tespit edilmesinde kullanılmaktadır.

f. Askeri: Lazer ışığının özellikleri, mesafe ölçme, hedef tespiti ve silah yapımında lazer kullanımını cazip kılmaktadır. Lazer radar sistemleri, istenen hedefleri imhada yüksek bir hassasiyetle kullanılmaktadır. Denizaltıların uzun sürelerle gizlendikleri yerlerde haberleşme imkanları mavi lazer ışığı ile uydular aracılığıyla mümkün olabilmektedir.

## 2.2.16. Lazer Tehlike Sınıfları, Lazer Kullanımında Emniyet - Lazer Işınından Kaynaklanan Tehlikeler

Lazer tehlikesi denilince, akla ilk olarak güçlü bir lazerin kesici özelliği gelir. ancak bu çok az rastlanan bir durumdur. Lazerlerin yarattığı en önemli risk gözler için sözkonusudur; göz merceği, gelen yönlenmiş lazer demetini, yüksek enerji yoğunluklu bir noktaya odaklayacak olması nedeniyle UV ve IR bölgesindeki radyasyon, kornea tarafından soğurularak retinal hasara neden olur[15].

Lazerin görünmez oluşu ve dalga boyuyla bağlantılı olarak değişik yüzeylerden yansiyabilmesi tehlikesini daha da arttırmaktadır. Özellikle Karbondioksit lazer düz fakat mat bazı yüzeylerden, görünen ışığın aynadan yansıdığı gibi yansımaktadır.

Vücudun herhangi bir yerine lazer değmesi bir yanma hissi uyandıracığından, sağlık alanı dışında kullanılan çok yüksek güçteki lazerler hariç, lazerin ciltle temas etmesi ufak yanıklar hariç genelde çok önemli bir tehlike teşkil etmez. Buna karşılık göz gibi hassas bir organ için lazer ışığı önemli bir tehlike unsurudur.

Lazerler, uluslar arası standartlarda IEC 60825 ve Amerikan Ulusal Standartlar Enstitüsü'ne göre ANSI Z136.1 normu çerçevesinde temel olarak dört ayrı tehlike sınıfına ayrılır. Lazer, referans kabul edilen Sınıf 1 durumundan itibaren yüksek lazer gücüyle birlikte artan yaralanma riskinin ortaya çıkması nedeniyle lazerlerin sınıflandırılma gerekliliği ortaya çıkmıştır. Deriye oranla 100.000 kat daha hassas olan retina ulaşarak ciddi bir hasara yol açabilen görünür ve yakın kızılötesi dalga boylarında çalışan lazerler, özellikle göze verebilecekleri potansiyel tehlike dikkate alınarak sözkonusu standartlar oluşturulmuştur[16]. Çizelge 2.5.'te ANSI standardında lazerlerin güvenlik sınıflandırılması verilmiştir.

### Lazer Tehlike Sınıfları

- Sınıf 1 : Gözün demete doğrudan ve uzun süreli maruziyetinde dahi zararsız,
- Sınıf 1M : Optik elemanlarla (dürbün vb.) görüntülendiğinde zararlı,
- Sınıf 2 : Demete anlık maruziyette zarar vermez, bilinçli olarak doğrudan lazere bakıldığında tehlikeli,
- Sınıf 2M : Optik elemanlarla (dürbün vb.) görüntülendiğinde zararlı,

- Sınıf 3R :Demete doğrudan maruziyette zararlı, yaralanma olasılığı maruziyet süresi ile orantılı olarak artar,
- Sınıf 3B :Kısa süre de olsa demete doğrudan maruziyette zararlı, fakat saçılmalardan kaynaklanan maruziyetlerde genellikle zararsız,
- Sınıf 4 :Sadece gözün değil, derinin de doğrudan maruziyeti zararlı, ayrıca saçılmalardan kaynaklanan maruziyetlerde de zararlıdır[17].

**Çizelge 2. 5.** Lazer Cihazlarının Göze Verdiği Zarara Göre Sınıflandırılması

Sınıf	Tehlikesi	Demet Tipi	Çıkış Gücü(mW)
I	Demete maruz kalındığında göze zarar vermez	G, GZ	-
II	Demete maruz kalındığında göz refleksi korunmaya yeterlidir.	G	<1
IIIR	Odaklanmadığı sürece tehlikeli değildir.	G, GZ	1-5
IIIB	Korumasız bakıldığında göze zarar verir.	G, GZ	5-500
IV	Yansımaları bile göze ve deriye zarar verir.	G, GZ	>500
G:Görülebilir GZ:Görülemez			

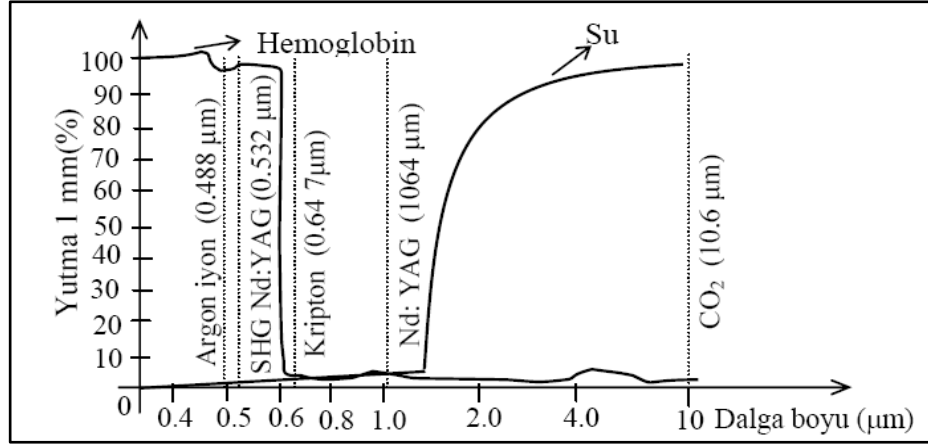
Lazer tarayıcı tasarımında kullanacağımız lazerin dalga boyu yaklaşık 800nm. olup, lazer sınıfı I dir(Çizelge2.6.).

**Çizelge 2. 6.** Lazer tarayıcı tasarımında hedeflenen değerler ve standartlar

Uygulama alanı	Dış ortam , Orta menzil	
Çalışma aralığı	0... 50m	(arttırılabilir)
Çözünürlük	5cm ... 15cm	(arttırılabilir)
Tarma oranı	0,5° ... 5°	
Tarama alanı	3 kademe	(arttırılabilir)
Tarama hızı	5Hz ... 15Hz	
Görüş açısı	< 90°	(arttırılabilir)
Arayüz	Rs232 ve/veya USB	
Çalışma gerilimi	+20 V DC ... +28 V DC	
Güç	< 1W	
Tahmini ağırlık	< 1kg	(artabilir)
Çalışma sıcaklığı	-10°C ..... 70°C	(ısıtma modülü eklenebilir)
Çıkışlar	3 adet (hızlı +24V)	(arttırılabilir)
Lazer sınıfı	Class 1M	IEC 60825-1 (2007-6)
Lazer dalga boyu	808nm ~ 1 $\mu$ um	
Lazer tipi	Smart Laser	(maks. Pals genişliği < 30nS)
Lazer anlık gücü (peak power)	> 14W	
Lazer ortalama gücü (average power)	< 30mW	(Class 1M)
Lazer duty ( duty cycle)	% 0.1	
Elektromanyetik uyumluluk	EN 61000-6-2:2005/EN 61000-6-3 (2001-10)	
Vibrasyon direnci	EN 60068-2-6 (1995-04)	
Şok direnci	EN 60068-2-27 (1993-03)/EN 60068-2-29 (1993-04)	

### 2.1.7. Lazer Işınından Kaynaklanabilecek Tehlikeler İçin Güvenlik Önlemleri

Çok yüksek güçteki lazerışın demeti gözle görülmeyen III-b ve IV. sınıf lazerler ile çalışılırken bu tip lazerler için tasarlanan koruyucu elbiseler giyilmelidir. IV. sınıf lazer cihazı kullanılırken yanmayan elbiseler giymelidir. Lazer cihazı çalışırken ortamda yanabilecek malzemeler bulundurulmamalıdır.Lazer ışın demetinin deride oluşturabileceği bir yanık zamanla vücut tarafından onarılabılırken, göze verebileceği zarar zamanla vücut tarafından onarılamamaktadır(Şekil 2.22.). Bu nedenle gözün lazer ışın demetinden korunması öncelikli güvenlik önlemi olmalıdır[10].Gözün korunması lazer cihazı tarafından üretilen dalga boyuna bağlıdır.Bir tip lazer için kullanılan gözlükler diğer bir tip lazer cihazı için kullanılamazlar.



Şekil 2. 22. Gözdeki su tabanlı dokuların ve hemoglobinin lazer ışın demetini yutması

Çizelge 2. 7. Lazer Sınıflandırmasına Göre Güvenlik Gereksinimleri

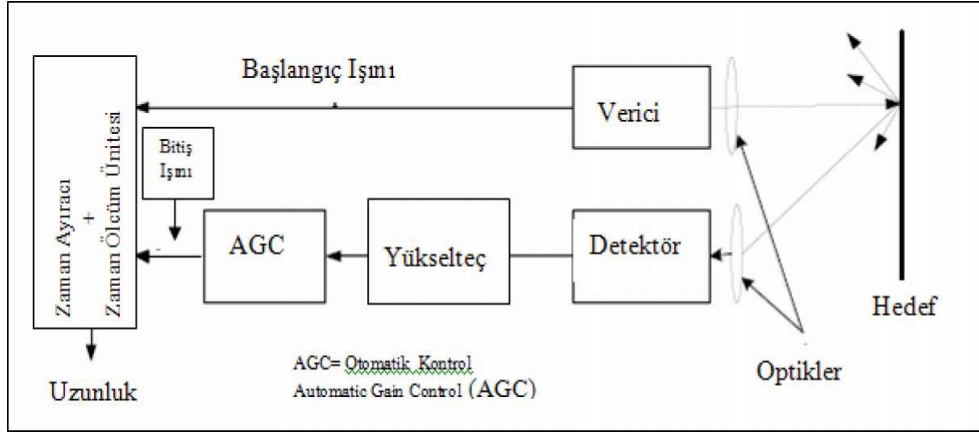
Sınıf	Usul ve İdari Kontrolleri	Eğitim	Tıbbi Gözetim	Lazer Güvenlik Görevlisi
1	Gerekli değil.	Gerekli değil.	Gerekli değil.	Gerekli değil.
1M	Gerekli	Uygulamaya Bağımlı (2)	Uygulamaya Bağımlı (2)	Uygulamaya Bağımlı (2)
2	Gerekli değil.(1)	Gerekli değil.(1)	Gerekli değil	Gerekli değil
2M	Gerekli	Uygulamaya Bağımlı (2)	Uygulamaya Bağımlı (2)	Uygulamaya Bağımlı (2)
3R	Gerekli değil.(1)	Gerekli değil.(1)	Gerekli değil	Gerekli değil (1)
3B	Gerekli	Gerekli	Önerilir.	Gerekli
4	Gerekli	Gerekli	Önerilir.	Gerekli

- 1) Kasıtlı ışına maruz kalma uygulamalarının haricinde gerekli değildir.
- 2) 1M ve 2M sınıftaki lazer sistemleri 1. ve 2.sınıftaki lazerleri aştığı için tehlike değerlendirme yapılmalı ve / veya üreticiye bilgi verilmelidir.

### 2.3. Uzaklık Ölçüm Teknikleri

Tipik bir lazer telemetresi genel olarak şu ögelerden oluşur[7]:

- Bir verici ( Transistorlü lazer veya yarı geçirken lazer diyot )
- Alıcı kanal ( Otomatik Algılama kontrolü (AGC), dedektör, yükselteç )
- Zaman ayırıcısı ve zaman ölçümü ünitesi ( Dijital çevirici (TDC) )
- Verici ve alıcı optikleri



Şekil 2. 233. Tipik atımlı lazer telemetrenin blok düzeneği

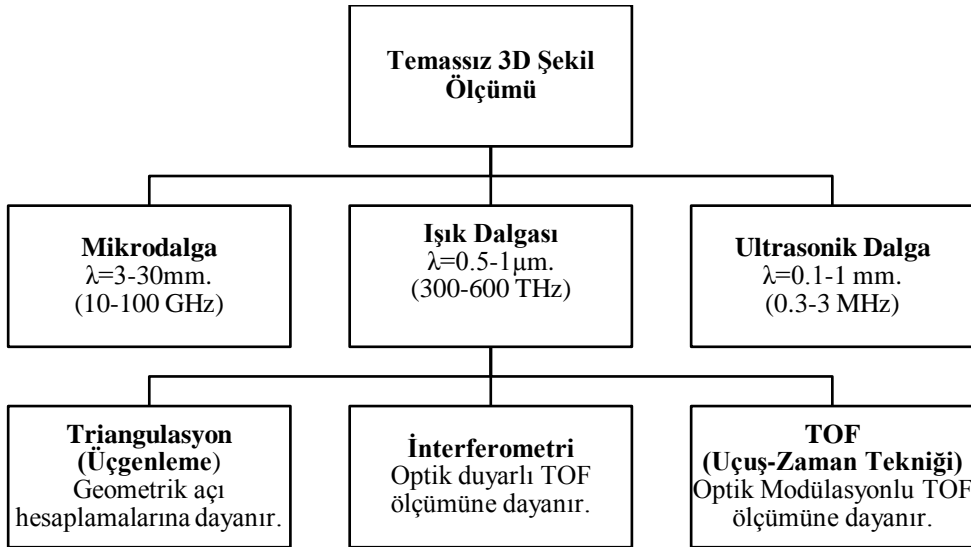
Lazer vericisi, biri alıcıya gönderilen ve zaman ölçüm ünitesini başlatan, diğeri objeye gönderilen iki parçaya ayrılmış başlangıç lazer atımı yayar. Dedektör, obje yüzeyinden geri saçılmış lazer sinyallerinin algılanmasında kullanılır. Taranmış objenin yüzeyine erişildiğinde lazer atımı geri saçılır ve bir kısmı dedektöre geri döner. Lazer atımının parlak gücü, elektrik akımına dönüştürülür. Alınan güç miktarı ses sinyali oranını ve mesafe duyarlığını etkilediğinden dolayı bu ilişkiyi analiz etmek önemlidir. Bahsedildiği gibi yayılmış lazer gücünün bir bölümü tarayıcıya dönecektir. Alınmış lazer gücü, verilmiş gücün çok küçük bir parçasıdır ve hedef yansımadaki değişikliklere bağlıdır. Otomatik algılama kontrolü (AGC) aracılığıyla zaman ölçümü ayarlanarak, alınmış atımın dinamikleri, optik veya elektriksiz azaltıcı tarafından fark edilir. Lazer atımının geri saçılmış parçası, tespit edildikten sonra, zamanlamayı çalıştıran ve zaman ölçümü ünitesini durduran zaman ayırıcısına yollanır[19].

Lazer telemetride kullanılan değişmez parça ayrımı (CFD) tekniği kullanılarak, dönüş atımı iki parçaya bölünür bir parça geciktirilir. Daha sonra bahsedilecek Son Eko Tekniği[25] olarak da bilinen teknikle geciktirilmiş ve geciktirilmemiş atımların ana ve diğer kenarları, atımın yarı genişlik noktasından geçerken zamanlamayı çalıştırır. CFD kullanımı dönüş atımının şekli ve genişlik değişimi tarafından kaynaklanan zamanlama hatalarını siler ve mesafe duyarlılığını artırır. Atımın yayılımı ve yüksek frekans osilatörü ile sayılan saat atımları numarası tarafından TDC ile ölçülen atımın geri saçılmış parçasının alınması arasındaki zaman aralığının (t) belirlenmesinde, analog iç değerlendirme metodu ile dijital sayım tekniği kullanılır. Hedefin tarayıcıya olan uzaklığı şu şekilde hesaplanır:

$$R = \frac{ct}{2} \quad (2.26)$$

Atımlı lazer telemetreleri için belirli maksimum duyarlılıklı mesafe (Rmax); TDC nin maksimum erimi ( bit sayısı ), obje yüzeyi yansırılığı, lazer gücü, atmosferik iletim, ışın sapması ve dedektör duyarlılığına bağlıdır.

**Çizelge 2. 8.** Temassız 3 Boyutlu Şekil Ölçümü Diyagramı

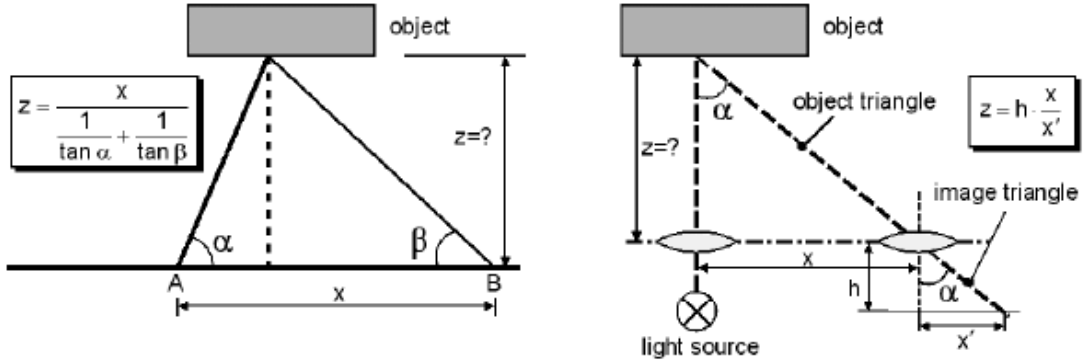


Bu tekniklerin hepsi ışık yoluyla çalışır. 400-1000 nanometre(görünür ve NIR spktrum)de çalışırlar[22].



### 2.3.1.Triangulation(Üçgenleme) Yöntemi

Bu teknik, milyonlarca yıl boyunca bilinen ve doğa tarafından kullanılmıştır; insan derinlik algısına dayanmaktadır. Üçgenleme geometrik yaklaşımı ile 2 noktası bilinen bir üçgenin hedefteki diğer noktasının hesaplamalar ile saptanmasıdır. Üçgenin açıları ve tabanı bulunarak hedefin uzaklığı saptanır.



Şekil 2. 244. Sol taraftaki pasif, sağ taraftaki aktif TOF üçgenleme yoluyla mesafe algılama

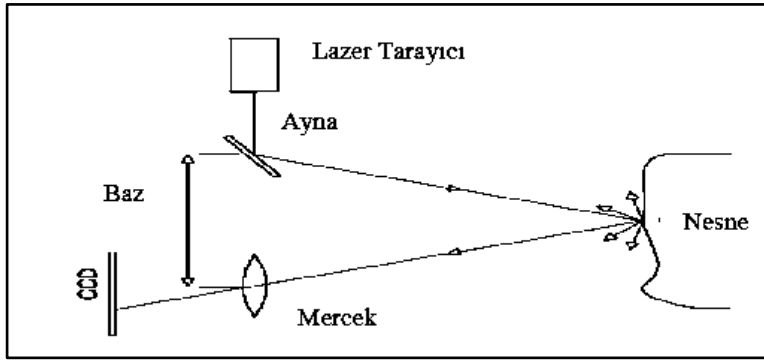
Üçgenleme Yönteminin varyasyonlarının birçoğunda lazer kaynağı ile video kamera arasında açıyı saptamaya dayanan bir tekniğe dayanır.

2D ölçümler: Tek boyutlu ölçümlere yeni referans noktası eklenerek 2 boyutlu ölçümler yapılabilir.

3D ölçümler: Süpüren lazer olarak anılır. 2 tane 2 boyutlu ölçümlerin birleştirilmesiyle elde edilir. Yine, bu işlem, ya bir dönme sehpası ile ya da bir dönen ayna ile elde edilebilir.

## Tekkamera çözümü

Bu tarayıcı basit bir ışın yayma düzeneğinden oluşur. Bu alet, mekanik aletin bir ucundan nesneye olan artan değişen açılarla ve lazer noktalarını sezen bir CCD kamerasıyla lazer ışınını gönderir. Yansıtıcı yüzey elementlerinin 3D pozisyonları, sonuç üçgeninden elde edilir. Bu prensip, menzil bulucuların kullanıldığı araştırmada önceliklere sahiptir. Bu açıdan, alet ve nesne arasındaki menzilin doğruluğu mesafe alanıyla birlikte iyi bilinir. Açıkça, uygulamayla ilgili sebeplerden dolayı, temel uzunluk isteğe bağlı olarak arttırılmaz. Bu tarayıcılar, uzaklık tarayıcılarından daha doğru olan durumlarda, kısa mesafeleri ve küçük nesnelere için önemli bir rol oynar.



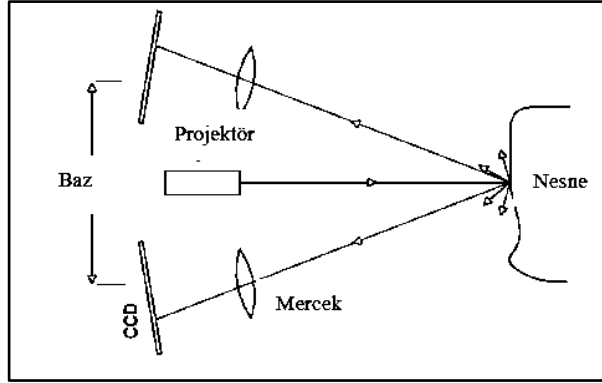
Şekil 2. 25. Triangulasyon Prensibi: Tek Kamera Çözümü

## İki kamera çözümü

Triangulasyon prensibinin bir değişkeni, iki CCD kamerası kullanımınıdır. İncelenen nokta ya da bölge, hiçbir ölçme fonksiyonu olmayan ayrı bir ışık projektörüyle üretilir. Çözümlerin geniş bir değişikliği görülebilir.

Projeksiyon, hareket eden şerit bölümlerinin bir ışık çizgisinden oluşur. Geometrik çözüm, tek kamera prensibiyle aynıdır, aynı doğruluk sonuçlarını oluşturur. İki kamera kullanan aletlerin tümü yüksek oranlar sağlamaz ve gerçek zamanlı 3D koordinatları üretmezler. Bununla birlikte, eğer yüksek nokta oranları ve gerçek

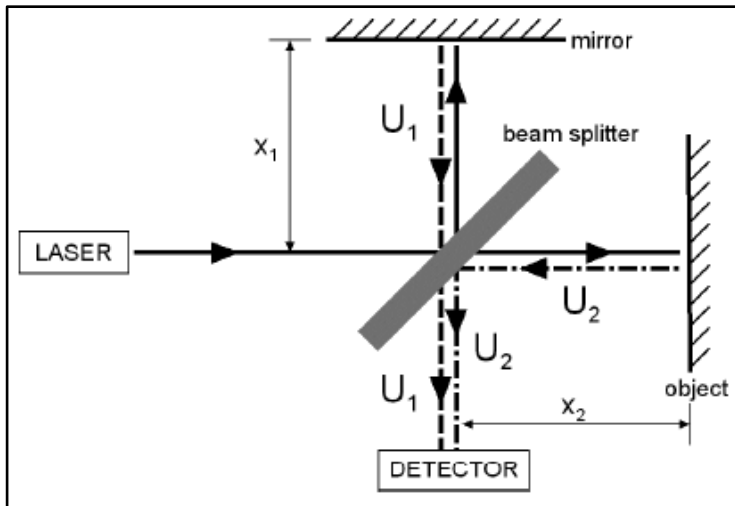
zaman süreci sağlanırsa, bu aletler, yukarıda belirtilen tarama aletlerine bir alternatif olarak görülebilir.



Şekil 2. 26. Triangulasyon Prensihi: İki Kamera Çözümü

### 2.3.2.İnterferometre

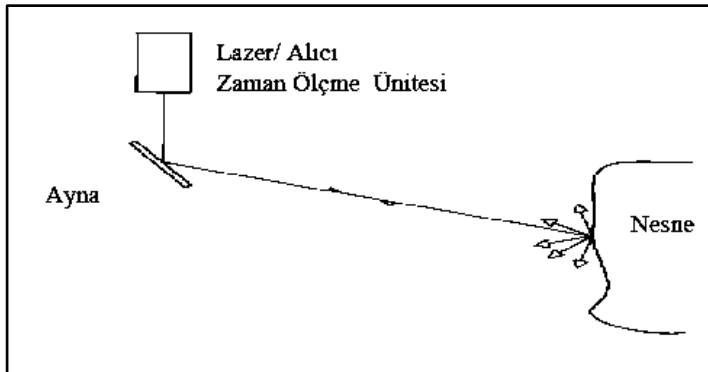
Girişimölçer ya da İnterferometre ışığın girişim özelliğinden faydalanılarak çok küçük mesafelerin ve maddelerinin kırılma indislerinin ölçümünde, saydam cisimlerin yüzeylerinin düzgünlüğünün kontrolünde, çok küçük hareketlerin ölçülmesinde ve yıldızların yarıçaplarının belirlenmesinde kullanılan bir ölçü aletidir.



Şekil 2. 27. Michelsen İnterometri Çalışma Prensihi

### 2.3.3.Uçuş Zamanı Tekniği(Time of Flight-TOF)

Bir lazer ışını nesneye gönderilir ve gönderici ile yüzey arasındaki mesafe, sinyal iletimi ile alımı arasındaki seyahat zamanı ile ölçülür. Bu prensip, total stationların çalışma prensibinden dolayı da iyi bilinir. Aslında, motor ekseni total station, tarama aleti olarak çalışmaya programlanabilir. Ölçüm oranları çok düşük olabilir, bununla birlikte aletin kütlesi nedeniyle eksen etrafındaki artan rotasyon basamakları yeterince hızlı değildir, sinyal süreci çok vakit alır ve açısal değerler kodlanmış çemberlerden zahmetli bir şekilde okunmalıdır. Tarayıcılar, lazer ışının açısal sapması için küçük dönüş aletleri kullanırlar ve uzunluk hesaplaması için basit algoritmalar kullanır. Uzaklık ölçümlerinin tipik standart sapmaları, birkaç milimetre olmaktadır. Uzaklıkların göreceli olarak kısa olmasından dolayı, bu doğruluk, tüm nesne alanı için hemen hemen aynıdır. 3D doğruluğu aynı zamanda, ışının açısal noktalama doğruluğundan etkilenir[23].



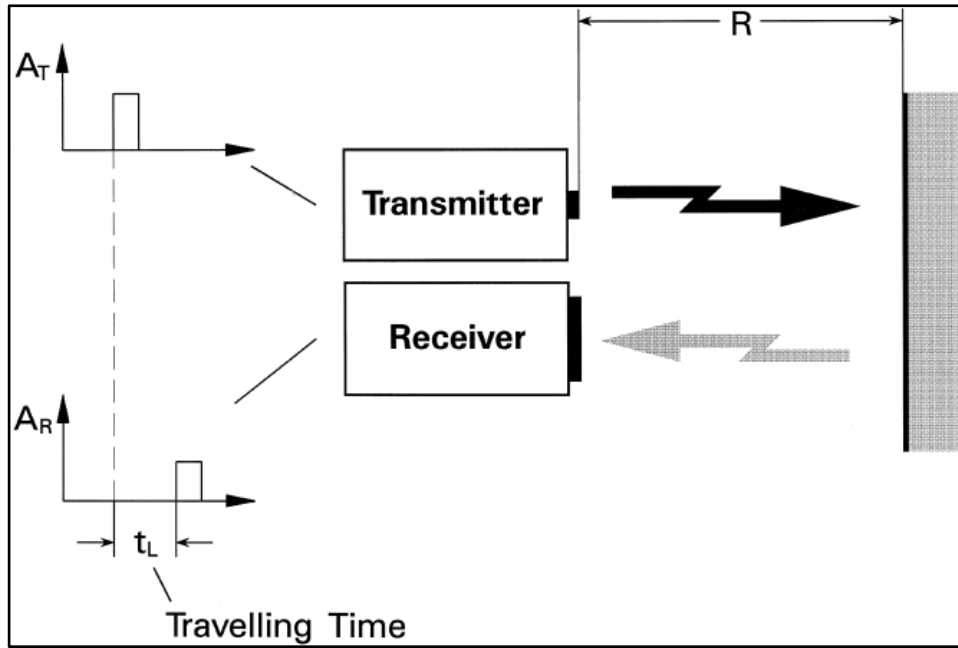
Şekil 2. 28. Uçuş zamanı prensibi

Uçuş zamanı (Time of flight) tekniği ile gönderilen bir ışık dalgasının cisim veya hedefin yüzeyine yansıyor geri dönüş süresi ölçülür. Ölçülen geri dönüş süresi ile sabit olan ışık hızından yola çıkarak sensör ve cisim arasındaki mesafe hesaplanır. Objenin uzaklığı  $d$ , lazer darbesinin katettiği yolun yarısı kadardır.

$$d = c \times t / 2 \quad (2.27)$$

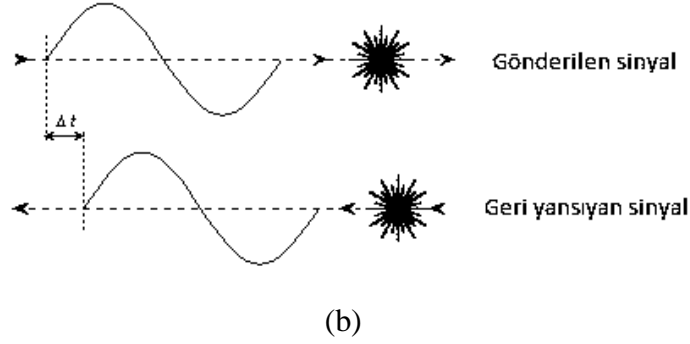
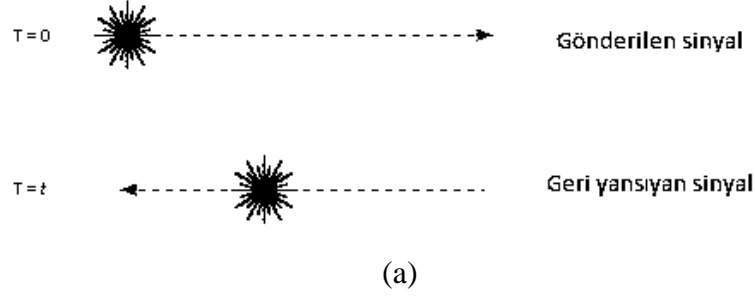
Kısa mesafelerden uzun mesafelere kadar yüksek hassasiyetle mesafe ölçümü yapabilir. Saniyede birkaç örnekleme ile uzun kilometre mesafelerinin ölçümü yapabilir. Uçuş zamanı ürünleri yüksek mesafeleri hızlı bir şekilde ölçmek için kullanılan bir tekniktir. Bu teknik ile kısa mesafeleri herhangi bir özel hedeflemeye ihtiyaç duymadan noktasal olarak ölçüm yapabilir.

TOF tekniğinde tarayıcı tipik Elektromanyetik Radyasyon(ER) darbeleri yayar. Tarayıcının üzerine monte edilmiş ışığa duyarlı (fotodiyot alıcı) sensör ile geri darbeli lazer ER bir bölümünü yansıtır. Bir iç saati iletim ve darbenin tepkisi arasında geçen süreyi ölçer. Dahili mikroişlemci lazer tarayıcının nesne ile uzaklığının ölçümünü ve raporlamasını yapar. Aşağıdaki şekil TOF lazer diyagramını göstermektedir.



Şekil 2. 29. Uçuş-Zaman (TOF) tekniği şematik gösterimi

Uçuş zamanı süresi aletleri mesafeyi uzaktan belirlemek için kullanılan iki yöntem vardır; uçuş zamanı süresince geçen zamana göre ölçüm ve uçuş zamanı süresince oluşan faz farkına göre ölçüm(Şekil 2.30).



**Şekil 2. 300.** a) Uçuş zamanı süresince geçen zamana göre ölçüm b)Uçuş zamanı süresince oluşan faz farkına göre ölçüm

Işık dalgası kısa bir darbe süresi kadar gönderilir, yansıyan ışık dalgası ile geri dönüş süresi alıcıdaki donanım tarafından işlenerek mesafe bilgisi elde edilir(Şekil 2.30a).

Işık dalgası kısa bir darbe süresi kadar gönderilir, yayılan ışık dalgası ve yansıyan ışık dalgası arasında bir faz farkı oluşur. Gönderilen ışık dalgası ile yansıyan ışık dalgası karşılaştırılır ve aralarındaki faz farkı ile geri dönüş süresi alıcıdaki donanım tarafından işlenerek mesafe bilgisi elde edilir(Şekil 2.30b). Faz Karşılaştırma Metoduyla Darbe (Pulse) ve Sürekli Dalga (CW) Sinyali ile Mesafe Tayini yapılabilir. İyi tanımlanmış bir dönüş sinyaline ihtiyaç olduğu için, faz kıyaslama metodunu kullanan tarayıcılar, kısa uzunluklarda daha etkilidir.

Menzil ölçümlerinde iki ana ölçüm yöntemi uygulanır: Darbeli değişen sinyal ilkesi, ve iletilen ve obje yüzeyinden saçılarak alınan bir sinyal arasındaki faz farkı ölçümüne göre değişen sinyal ilkesi. Faz farkına dayanan method devamlı salınan ışın ile uygulanır. Bu şekildeki lazerler sürekli dalga lazerleri(CW) olarak adlandırılırlar.

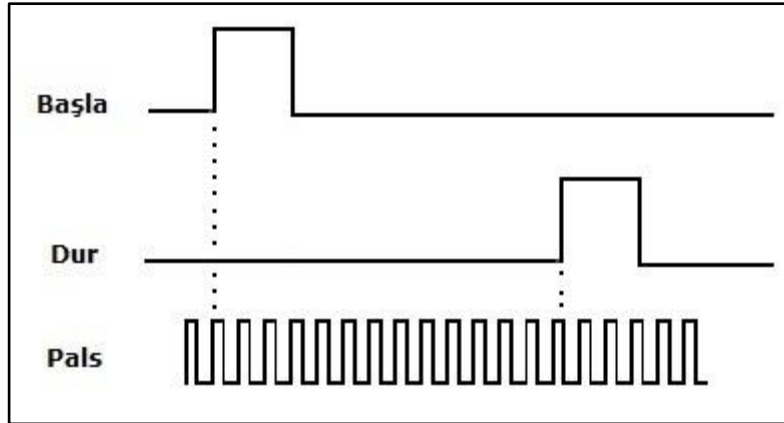
Genelde darbeleri lazerler kullanılmaktadır. Darbeleri lazerler çoğunlukla yüksek güç çıkışı veren katı hal lazerleridir. CW lazerler ile darbe lazerlerinin değişik fiziksel koşullar altında aldığı yolun ölçümleri gösterilecektir[4].

Her iki teknik mevcut ortamda ışık hızının doğru cevaplamaı yeteneğine sahiptir. Diğer bazı sistemler otomatik olarak işletim ortamı dengelemek için algılama cihazları içerebilmekte ve bazı enstrümanlar gerektirebildiği gibi, sınırlı bir sıcaklık ve nem aralığında çalışmak üzere onaylanmışlardır.

Tipik Ölçüm Örnekleri:

- Uzun mesafe ölçümleri
- Malzemenin hacminin hesaplanması
- Kesit ölçümleri
- Hareket aralığı ölçümleri ve hareket kontrolleri
- Hızlı varlık veya yokluk kontrolleri

### 2.3.3.1. TIC(Time To Interval Converter) Methodu



Şekil 2. 31. TIC (Time to interval converter) ile yapılan ölçme tekniği

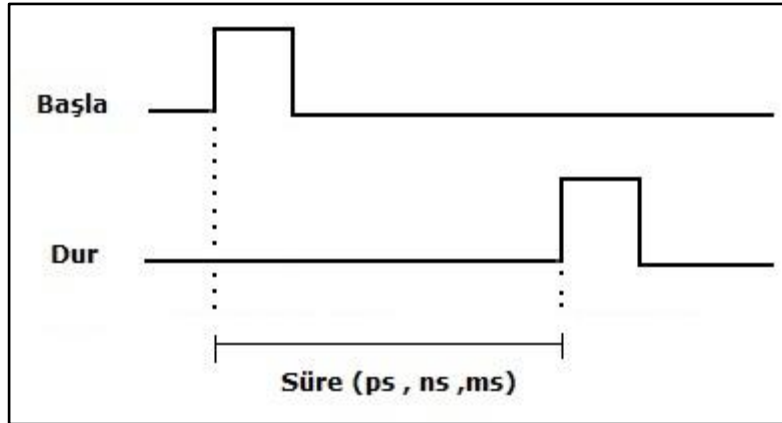
Bir diğer ölçüm metodu ise TIC (Time to interval converter) ile yapılan ölçme şeklindedir.

Işık dalgası kısa bir darbe süresi kadar gönderilir (Başla), yayılan ışık dalgası ve yansıyan ışık dalgası (Dur) arasında bir zaman farkı, gecikme oluşur. Gönderilen ışık dalgası ile yansıyan ışık dalgası arasında hızlı bir dijital sayıcı ile donanım tarafından üretilen palsler sayılır ve sayılan palsler ile dönüş süresi sistem tarafından hesaplanarak mesafe bilgisi elde edilir.

Hesaplama yöntemi ;

Donanım tarafından üretilen pals sinyalinin yükselen kenar ve düşen kenar arasındaki süre bilinmektedir. Gönderilen ışık dalgasının (Başla) ve yansıyan ışık dalgasının (Dur) arasında TIC tarafından sayılan pals sayısı ile donanım tarafından üretilen palsin yükselen kenar ve düşen kenar arasındaki süre çarpıldığında gönderilen sinyal ile yansıyan sinyal arasında geçen süre hesaplanmış olur. Sabit olan ışık hızından yola çıkılarak elde edilen süre ile mesafe bilgisine hesaplanarak ulaşılır.

### 2.3.3.2. TDC (Time to digital converter) Methodu



Şekil 2. 32. TDC (Time to digital converter) ile yapılan ölçme tekniği

Bir diğer ölçüm metodu ise TDC (Time to digital converter) ile yapılan ölçme şeklidir. Gönderilen ışık dalgası ile yansıyan ışık dalgası arasındaki süre sistem tarafından pikosaniye diliminde ölçülür ve digital bilgi olarak “SPI” gibi elektronik



haberleşme protokolleri ile mikrodenetleyici veya mikroişlemci ünitelerine servis edilir. Aynı zamanda haberleşme protokolü ile ölçüm konfigürasyon ayarları yapılabilmektedir. Bu sistemler tek başlarına sadece ışık dalgasının gönderilme ve yansıma işlemleri arasında geçen sürenin hesaplanması kısmını yapabilmektedirler. Ek olarak sürücü ve alıcı ve detektör devrelerin sisteme uygun olarak tasarlanmaları gerekmektedir.

Hesaplama yöntemi ;

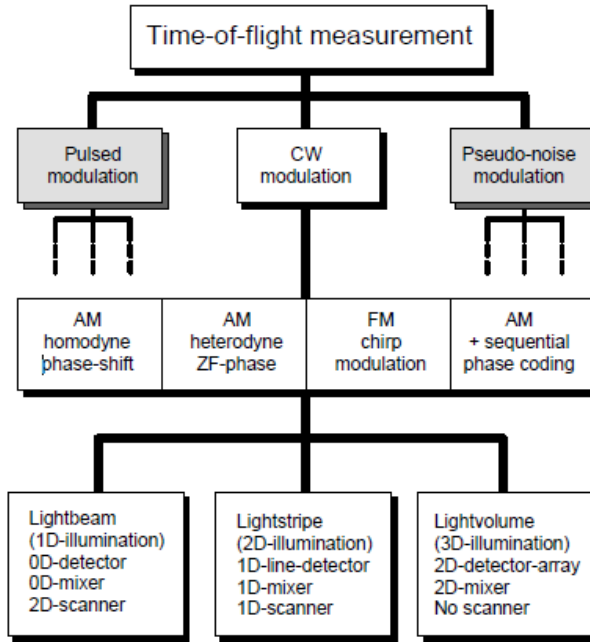
TDC, gönderilen ışık sinyali ile yansıyan ışık sinyali arasında geçen süreyi dijital olarak hesaplanmış bir şekilde sunulmaktadır. Mesafe aralığı; 0,45 m – 570 m, Ölçme çözünürlüğü; 19mm için örnek ölçümler ;

1ns > 150mm

100ps > 15mm

10ps > 1,5mm

TOF mesafe ölçme tekniğinde genel olarak darbe modülasyonu, sürekli dalga modülasyonu veya her ikisinin kullanıldığı pseudo-noise modülasyonu kullanılır. Şekil 2.33'te TOF Modülasyon Prensipleri ve 3D TOF gerçekleştirilmesine ait diyagram görülmektedir[22].



Şekil 2. 33. TOF Modülasyon Prensipleri ve 3D TOF gerçekleştirilmesi

### 2.3.4. Lazer Dalga Boyu Seçimi

Lazer optik dalga boyu seçimi lazer tarama dizaynı ile bağıntılıdır. En hassas lazer tarayıcılar 800nm ile 1000 nm. arasındadır. Daha yüksek enerji darbeleri lazerlerde(>1000nm.) göz güvenliği(eye-safe) hassasiyeti düşmektedir.

Lazerler yüksek güç, fiziksel özelliklerinin avantajlı olması nedeniyle (kısa darbe, CW sistemlerinde sinyalin module edilebilme, yüksek yönlendirilebilme ve lazerin yayıldığı dar optik spektrum özellikleri) lazer tarayıcılarında kullanılır. Dar spektral çizgi lazerleri avantajlıdır, çünkü daroptik girişim filtreleri(genellikle10nm. bant genişliğinde) rahatsız edici arka plan radyasyonunu bastırmak için alıcıyolunamonte edilebilir.

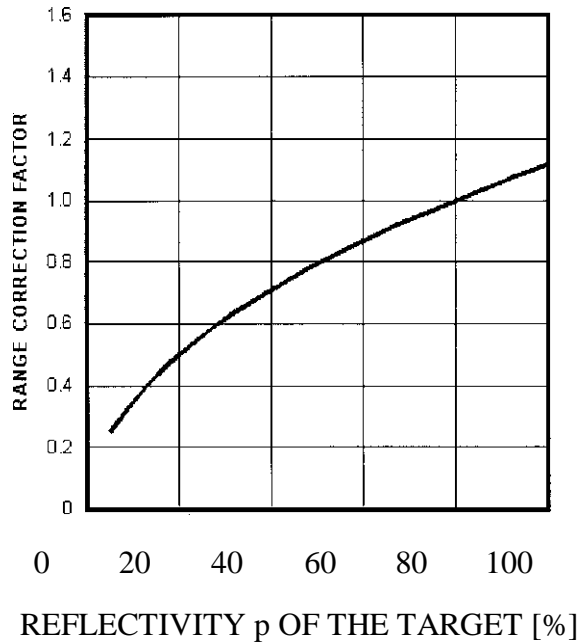
**Çizelge 2. 9.** 900 nm. lazer ışığının çeşitli yüzeyler üzerinden yansımaya değerleri(Riegl web sayfası)

Madde	Yansımaya Yüzdesi (%)
Kereste(kuru çam)	94
Kar	80-90
Beyaz Kâğıt	85
Kireçtaşı, kil	Up to 75
Yaprak döken ağaçlar	Typ. 60
İğne yapraklı ağaçlar	Typ. 30
Karbonat kum (kuru)	57
Karbonat kum (nemli)	41
Plaj kumları, çıplak alanlar	Typ. 50
Kaba ahşap	25
Pürüzsüz beton	24
Çakıl asfalt	17
Lav	8
Sentetik kauçuk	5

Lazerin dalga boyuna karar verilirken, hedef yüzeyinden geri saçılmalar göz önüne alınmalıdır. Su, kum, bitki örtüsü yansımaya katsayıları diyagramından anlaşılacağı üzere 1530 nm. iyi bir seçim değildir. 1530 nm.lazer ışını buz, kar ve buz üzerinde zayıf yansımaya sahiptir. O nedenle 810 nm. lazer seçimi daha uygun olacaktır. Çizelge 2.9.'da 900nm. deki lazer ışınının çeşitli materyaller üzerinden yansımalarının tipik değerleri verilmiştir.

Belirtilen dalga boyundaki lazer ışınının hedef üzerinden yansımaları maksimum menzili etkiler. Bu nedenle üretici firmalar lazer ışınının maksimum menzili, hangi tür yansımaların olabileceğini, yansımaya katsayısını belirtirler.

Şekil 2.34.'te görüldüğü gibi Riegl Firmasının (900nm dalga boyunda % 80 yansıtma ile yaygın hedefleri için verilen maksimum menzile özellikleri) lazeri için hedef yansıtıcılık ve aralık düzeltme diyagramı görülmektedir. Şekilde görüldüğü gibi, %20 ile % 10 oranlarına sahip yansıtma hedefleri arasında lazer özelliklerinde verilmiş olan, maksimum aralığı % 50 ve % 35 arasındadır.



**Şekil 2. 34.** Hedef yansıtıcılığına göre Maksimum lazer menzili için Düzeltme Faktörü (Riegl Firması 900 nm dalga boyunda etki hedefleri, verilen maksimum menzile bağlı olarak % 80 yansıtma için düzeltme faktörü)

### **2.3.5. Optoelektronik sistemlerin tasarımında optik sinyallerin seçilmesi**

Optoelektronik sistemlerin tasarımında optik sinyallerin seçilmesi, oluşturması ve algılanması büyük önem taşımaktadır. Buna göre optik sinyaller tasarlanan sistemin özelliklerine göre seçilmelidir. Gereken optik sinyalin seçilmesi için sistemin çalışma frekansı, hızı, fon etkisi, ortamın özellikleri, mesafe ve gereken güçler belli olmalıdır.

### **2.3.6. Optik Sinyallerin Modülasyonu ve Demodülasyonu**

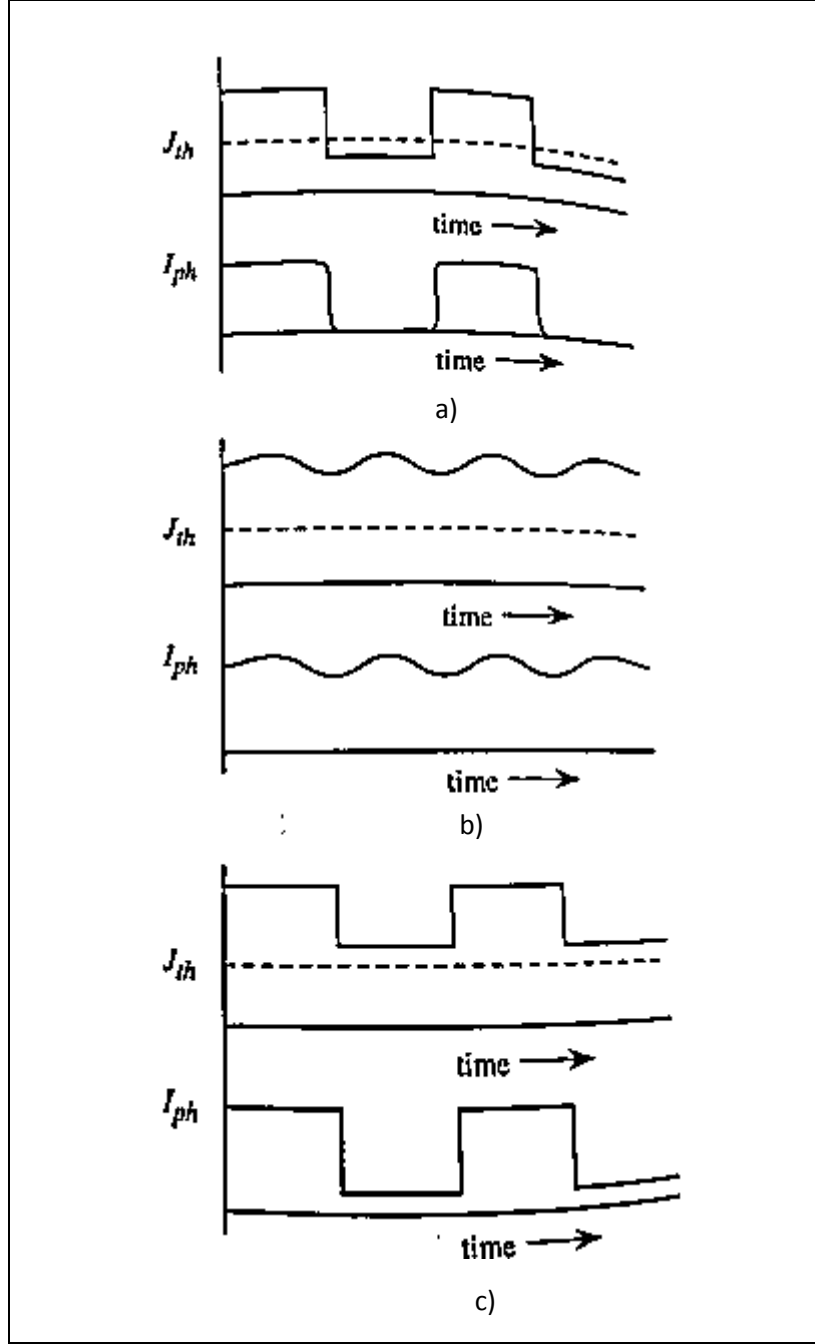
Optik sinyali fotosinyale dönüştürmek için bu sinyali gerekli seviyeye getirmek üzere modülasyon işlemi yapılır. Optoelektronikte haberleşmede kullanılan modülasyon türleri kullanılır.

Optik sinyali fotosinyale çeviren fotoalıcılar genelde dış fon etkisi altındadırlar. Modüle edilmiş optik sinyalle çalışan sistemler ya elektro-optik ya da mekanik modülatör ile çalışır.

Modüle edilmiş optik sinyal ile oluşmuş fotosinyal dış gürültülerden ve fondan etkilenmez. Fotoalıcıda fotosinyalden bilgiyi tekrar elde etmek için demodülasyon uygulanır. Optik sinyalin modülasyonu birkaç çeşit olabilir:

- 1) Genlik Modülasyonu,
- 2) Frekans Modülasyonu,
- 3) Darbe-Kod Modülasyonu

Bu modülasyon türleri birlikte de kullanılabilirler. Yüksek hızlı ışık, TOF scanner ile sn.de 50.000 örnek ölçmesine imkan verir. Çoğu kez, çoklu darbeler ve en küçük kareler yöntemiyle güvenilirliği artırılır. TOF varyasyonlarından faz kaydırma methodu ile mesafe ölçümleri yapılabilir.



**Şekil 2. 35.** Lazer sinyalinin üç farklı modülasyon yaklaşımı ile gösterimi: Büyük Sinyal Modülasyonu, Küçük Sinyal Modülasyonu, Darbe Kod Modülasyonu[24]

Analog haberleşmede aynı anda iki modülasyon türü kullanılamazken (bir taşıyıcı bir tek mesaj işareti tarafından modüle edilebilirken), optik haberleşmede iki farklı mesaj bir taşıyıcı ile modüle edilebilir.

### 2.3.7. Güç

- Dalgaboyu(Her lazer tipinde lazerde kullanılan madde, optik sistem ve uyarma yöntemine göre dalga boyu değişir.)
- Çıkış gücü(Darbe Sinyali)
- *Emisyon(Yayılma) Süresi*

*Darbe Enejsi=Pik Gücü x Darbe Uzunluğu*

$$P = dE / dt \quad (2.28)$$

$$E_p = \int_{t_1}^{t_2} P(t).dt$$

Ortalama Güç=( $\Delta t$  zaman içindeki darbe sayısı x Darbe Enerjisi)/ $\Delta t$

Optoelektronikte ışık spektrumunun ultraviyole, görünür ışık ve kızılötesi bölgelerinde kullanılabilir.

- Ultraviyole bölgesinde çalışılırsa ortam kayıpları minimum olur, buna karşılık ultraviyole ışınlar canlı vücudu için tehlikelidir.
- Görünür ışık ise canlılara zarar vermez fakat ortamın fon etkisi büyük boyutlardadır.
- Kızılötesi(infraruj) ışınlar ise ortamın fon etkisi söz konusu değildir. Ayrıca canlılar için de bir tehlike oluşturmaz. Fakat ortam kayıpları çok fazladır.

Modülatör ışın verici ve fotoalıcı tarafında yerleştirilebilir. Modülasyon ışın verici tarafında yapılırsa zaman içinde istenen ışın şiddeti elde edilebilir. Modülasyon fotoalıcı tarafında gerçekleştirilirse kanal seçme avantajı vardır.

Elektriksel modülasyonda yarıiletken ışın verici kullanılır. Yarıiletken ışın verici içeren optik şemalarda elektriksel modüle edilmiş ışınlar optik kanalda bir daha modüle edilebilirler. Elektriksel modülasyonu gerçekleştirmek için yarıiletken ışın vericiler kullanılmaktadır. Yarıiletken ışın vericiler lazerler ve LED'lerdir.

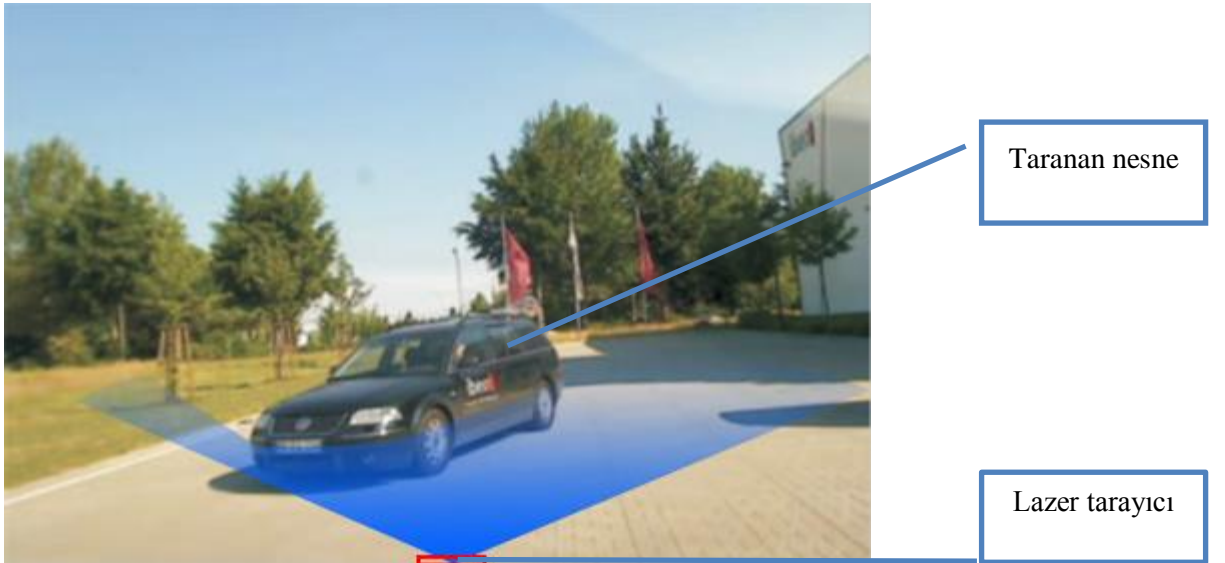
Elektriksel modülasyonda lazerin veya LED'in akımı modüle edilerek yayılan ışın modüle edilmiş olur. Optik kanalda modülasyon, elektrooptik modülatör ile gerçekleştirilir. Elektrooptik modülatör; lazerden veya LED'lerden gelen ışığı gerekli frekansta modüle eder. Elektriksel modülasyon ve optik kanalda modülasyon birlikte kullanılabilir. Örneğin aynı zamanda hem lazer akımı ile modülasyon hem de optik kanalda modülasyon yapılabilir.

**Çizelge 2. 10.** Çeşitli lazer tarayıcı sistemlerinin teknik özellikleri

<b>MLS System</b>	<b>Road Scanner</b>	<b>IP-S2 Compact</b>	<b>MX8</b>	<b>StreetMapper 360 or Portable</b>	<b>VMX-250</b>	<b>Dynascan</b>	<b>Lynx Mobile Mapper</b>
<i>Tarayıcı adı</i>	<i>Faro Photon 120</i>	<i>Sick LMS 291</i>	<i>VQ-250</i>			<i>MDL scanner</i>	<i>Lynx laser scanner</i>
<b>Maksimum menzil / Hassasiyet aralığı</b>	120m (p90%)	80m (p10%)	200m (p80%)			up to 500m	200m (p80%)
	1mm@25m,p90%	10 mm @ 20 m	5mm @150m,(1a)				8mm,1a
<b>Aralık doğruluğu</b>	± 2mm@25 m	± 35mm	10mm @150m,(1a)			± 5cm	± 10mm,(1 a)
<b>PRR</b>	122- 976 kHz	40kHz	up to 600 kHz(2 x 300 kHz)			36 kHz	1000 kHz (2 x 500 kHz)
<b>Tarama hızı</b>	48Hz	75Hz	200 Hz( 2x 100 Hz)			up to 30 Hz	200 Hz ( 2x 100 Hz)
<b>Scanner FOV</b>	H360° / V320°	180° ( ty 90° <sup>(2)</sup> )	360° without gaps			360°	360° without gaps
<b>Açısal Çözümleme</b>	H0,00076° / V0,009°	1° ( 1)/ 0,5° <sup>(2)</sup>	0,001°			0,01°	0,001°
<b>Ağırlık</b>	14.5 kg	22.7kg	approx. 11kg			11kg	78 kg

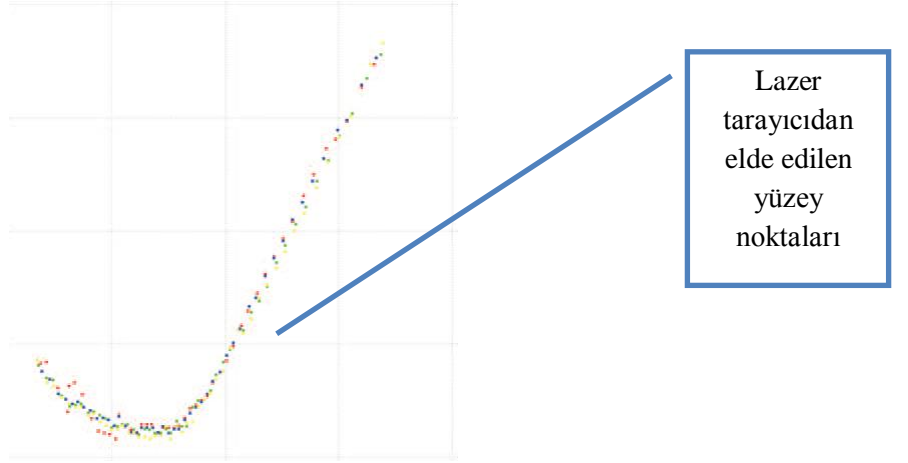
### 3. YÖNTEM

Çalışmamızda radar teknolojisine benzer şekilde çalışan tramvay üzerine takılacak lazer tarayıcıdan(LD-RMS400001) gönderilen ve alınan verilerin karşılaştırılması ile yapılacak programla birlikte lazer tarayıcı sisteminin prototipinin oluşturulması ana hedeflerdir. Çalışmamızda Şekil 3.1.'de gösterildiği gibi yatay düzlemde lazer ışınları kullanılarak, taranan noktalardan nesne oluşturup, objelerin uzaklığını, hareket yönünü ve çarpışma olasılığını tespit edebiliyoruz. Radar teknolojisinde kullanılan radyo dalgaları yerine ışık, yani lazer darbeleri kullanılır. Böylece aynı teknoloji tramvaya da uygulanacaktır. Burada yapılan örnek uygulamada radar teknolojisine benzer şekilde çalışarak bir araca gönderilen lazer ışınları ile aracın durum bilgisini vermesi gösterilmiştir. Lazer tarayıcı sabit olduğu için aracın hareketi ve yönü tarama sinyallerinin eşleştirilmesi ile tayin edilebilmektedir(Şekil 3.2)[25].



**Şekil 3. 1.** Lazer tarayıcı ile nesnenin algılanması



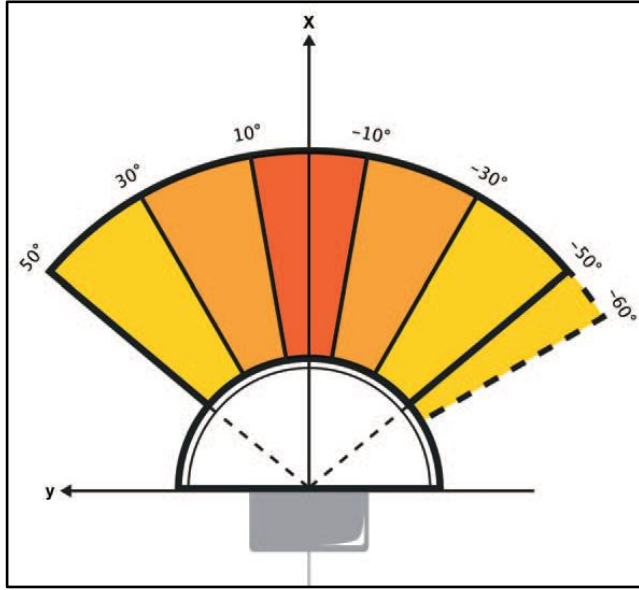


**Şekil 3. 2.** Lazer Sistem Çalışma Mantığı

### **3.1. BAĞLANTI VE HAZIRLIK**

Lazer tarayıcıdan gelen sinyalleri işleyecek bilgisayar ile bağlantının gerçekleştirilebilmesi için lazer tarayıcının IP numarası ile bilgisayar bağlantısı aşağıda açıklandığı şekilde yapılması gerekmektedir[25].

- Bağlantı için gerekli veri paketlerinin değişkenleri hazırlanmalı.
- Lazer tarayıcı çevrim içi durumu kontrol edilip, ayarlanan IP(192.168.0.201) adresine **ping** ile kontrol edilmeli. Böylece lazerin ağda olup olmadığı kontrol edilmiş olur.
- Ping başarılı olur ise ayarlanan port numarasına (12002) bağlantı kurulmaya çalışılıyor.
- Nokta ve nesne çiziminde kullanılacak koordinat sistemi hazırlanıyor ve çizdiriliyor (Şekil3.2.).
- Lazer tarayıcı ile bağlantı kuruldu ise veri alış/verişi başlatılıyor.



**Şekil 3. 3.** Koordinat Sistemi Program Görüntüsü

Bu aşamadan sonra program ve lazer tarayıcı işleme hazır hale gelmiş ve verilerin işlenmesi aşamasına geçilebilecektir.

### **3.1.1. Lazer tarayıcı veri okuma**

Lazer tarayıcı ile cismin tespiti için yazılan programın çalışması esnasında çeşitli veri tipleri kullanılmaktadır. Bunlar sırasıyla 0x2202, 0x2221 ve 0x2030 olarak adlandırılmıştır. Bu isimlendirme lazer cihazın haberleşme protokolünden gelmektedir. Sırasıyla bu veriler ve işlenişleri aşağıda anlatılacaktır.

#### **Veri türü 0x2202**

Bu veri türü başlangıcı algılandığında lazer tarayıcıda, taranan noktalar verisi hazır demektir. Veriler “little endian” biçiminde kodlanmıştır. Bu bir kodlama tipidir. Kodlar eski ve yeni kısmı ters çevrilerek hata payı azaltılacak şekilde haberleşmek üzere ayarlanır.

Açı bilgisi için, lazer ünitenin nokta açı birimi kullanılır. Lazer tarayıcımız 110 derece tarama açısına sahiptir. Cihazda döngü başına yani 360 derecede 11520 nokta kullanılmaktadır. Böylece açısal çözünürlük (1/32) nokta/derece olarak bulunur. Bu değer yazılımda esas alınacak açı dönüşümü için gereklidir.

$$\text{AÇI} = 2 * \text{Pi} * (\text{Açı noktası}) / (\text{döngü başına toplam nokta sayısı})$$

şeklinde hesaplanmaktadır. Bu veri paketinin içeriği ve nokta dizi formatı Çizelge 3.1 ve Çizelge 3.2’de açıklanmış olmakla birlikte tarayıcının konumuna göre algılanan nesnelere ait açısal bilgilerin elde edildiği kısımdır.

**Çizelge 3. 1.** Okunan Veri Paketi İçeriği

Byte	İçerik	Veri tipi	Açıklama
0	Tarama sayısı	UINT16	Tarama sayısı. Her taramada sayı, artırılarak tarama devam edecektir.
2	Tarayıcı durumu	bitfield 16 bits	0x0007: reserved 0x0008: set frequencyreached 0x0010: externalsyncsignal detected 0x0020: sync ok 0x0040: syncmaster (instead of slave) 0xFF80: reserved
...	...	...	...
24	Tarama açı başlangıcı	INT16	Bu taramada başlangıç açısı(nokta numarası)
26	Tarama açı bitişi	INT16	Bu taramada bitiş açısı(nokta numarası)
28	Taranan nokta sayısı	UINT16	Bu taramada, iletilen taranan noktası sayısı.
...	...	...	...
44	Taranan nokta listesi	Nokta liste formatı	Taranan noktalar dizisi.

**Çizelge 3. 2.** Nokta Listesi Dizi Formatı

	Katman	UINT4	Noktanın bulunduğu katman
0	Yankı	UINT4	Noktanın yankı numarası (0 yankısız)
1	Nokta durumu	Bit field 8 bits	0x01: transparentpoint 0x02: clutter (atmospheric) 0x08: dirt 0xF0: reserved
2	Yatay açı	INT16	Tespit edilen noktanın lazer tarayıcı koordinat sistemi yatay açısı.
4	Nokta mesafesi	UINT16	Noktanın lazer tarayıcısına santimetre cinsinden uzaklığı
6	Yankı mesafesi	UINT16	Santimetre cinsinden yankı uzunluğu

Yukarıda açıklanan Çizelgeler göz önünde bulundurarak veriler değişkenlere atanır ve çizdirme fonksiyonu başlatılır. Bilgisayar tarafından işlenen verinin özet durumu Şekil 3.4.'te verilmiştir.

0x2202 Scan data	
Scan number	13474
Scanner status	779
Set frequency reached	<input checked="" type="checkbox"/>
External sync signal	<input type="checkbox"/>
Sync OK	<input type="checkbox"/>
Sync master	<input type="checkbox"/>
Sync phase offset	0
Scan start time NTP	104892416
Scan end time NTP	
Angle ticks per rotation	11520
Start angle	1600
End angle	63616
Scan points	943
Mounting position yaw angle	0
Mounting position pitch angle	0
Mounting position roll angle	0
Mounting position x	0
Mounting position y	0
Mounting position z	0
Reserved	...
Scan Point List	942

**Şekil 3. 4.** Veri özeti

Burada başlangıç açısı, bitiş açısı, taranan nokta sayısı vb. birçok bilgi bir arada bulunmaktadır. Çizelge3.2.'deki yatay açısı ve nokta mesafesi hesaplanırken aşağıdaki formüller kullanılmaktadır.

Her nokta,

X noktası = Hipotenüs uzunluğu (nokta mesafesi) \* Kosinüs açısı,

Y noktası = Hipotenüs uzunluğu (nokta mesafesi) \* Sinüs açısı

trigonometrik denklemleri kullanılarak X ve Y noktaları tespit edilir.Hesaplanan X ve Y noktaları, yine Çizelge3.3.'deki katman ve yankı seviyesi göz önünde bulundurularak koordinat sistemine uygun renk seçeneği ile çizdirilir (Şekil 3.2.).

### 3.2. Ölçme Süreci ve Ölçümün Özellikleri

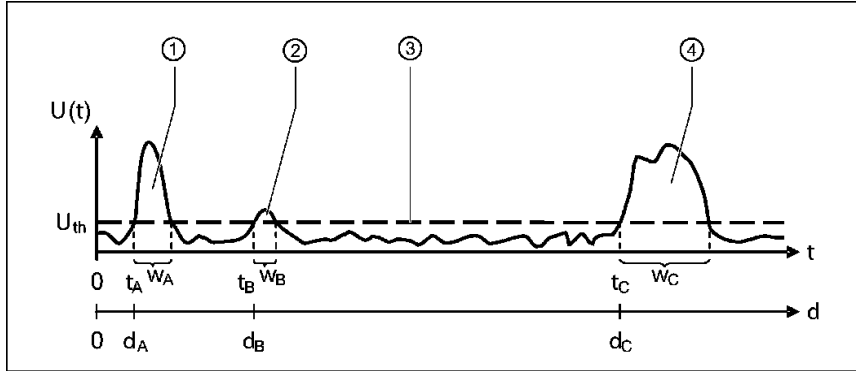
LD-MRS Uçuş Zamanı Tekniği(Time of Flight-TOF) teknolojisine dayalı bir ölçüm aletidir; LD-MRS nesnelere mesafe ve açısal konumunu tespit etmek için kullanılır. Bu sistem ile çevre, radyal şekilde dönen lazer ışınları ile tarama yapılır, ekolar bir foto diyot alıcıya ulaştırılır. Ulaşılan bilgiler ışığında Time Of Flight hesaplamaları yapılarak tarama sonucu ethernet arayüzüne iletilir.

Lazer ışını ile bağıntılı olan aynalar sürekli dönerek LD-RMS'in görüş alanındaki çevrenin tam olarak profili çıkarabilmektedir. LD-RMS tarama sonuçları; **uzaklık, açı, yankı darbe genişliği bilgilerini** içermektedir.

Ölçümün dayanakları[25]:

- Time-of-flight ölçümü
- Çoklu-eko yeteneği,
- Çoklu katman teknolojisi,
- Tarama alanı ve tarama açısı-alan arasındaki bağıntı
- Açısal çözünürlük ve tarama frekansı

### 3.2.1.Çoklu-Eko Yeteneği



Şekil 3. 5. Çoklu Eko Yeteneği 1)Cam panel ekosu 2)Yağmur damlası ekosu 3)Eşik Voltajı 4) Nesneye ait Eko

$V(t)$  :Giriş Voltajı

$t$  :Zaman

$d$  :Uzaklık

$w$  :Eko darbesinin genişliği

A :Cam panel

B :Yağmur damlası

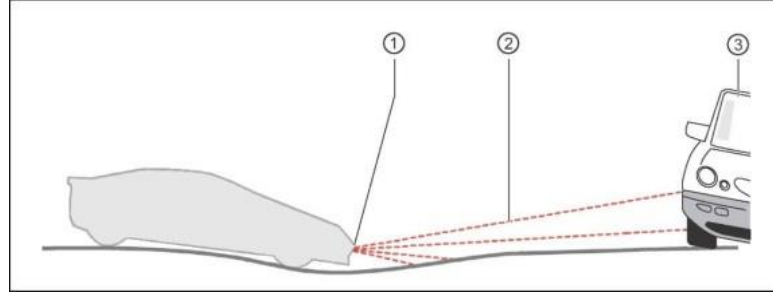
C :Nesne

$V_{th}$  :Eşik Voltajı

LD-MRS çoklu yankı yeteneğine sahiptir. Böylece, iletilen 3 ekonun değerleri toplanarak değerlendirilir. Eko darbesi önce LD-RMS'in foto diyod alıcısına ulaşır. Cam panelden yansıyan eko darbesi kısa periyotlu büyük bir voltajı oluşturur.

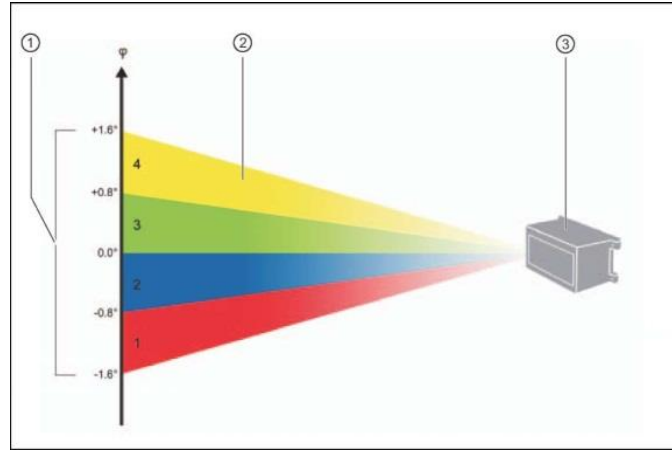
Yağmur damlasından yansıyan eko darbesi kısa periyotlu düşük voltaj oluşturur. Nesneden yansıyan eko darbesi ise daha uzun periyotlu yüksek voltaj oluşturur. Üç ekonun hepsi iletilen bir sinyalin yansımasından oluşmaktadır.  $V_{th}$  eşik voltajı eko sinyalini sistem gürültüsünden ayırır. Böylece sistem gürültüsü kaldırılır. LD-RMS  $V_{th}$  eşik voltajı üzerindeki genlikleri kullanarak o alandaki eko darbe genişlikleri  $w_{A/B/C}$  değerlendirilir.

### 3.2.2.Çoklu Katman Teknolojisi



Şekil 3. 6. Çoklu Katman Teknolojisi 1)LD-RMS 2)Tarama düzlemi 3)Nesne

LD-MRS cihazı araca monte edildiğinde çoklu katman teknolojisi ile 4 tarama düzleminde farklı eğim açılarında sahip dik açılar gönderilmesini sağlar. Böylece aracın hızlanma ve frenleme zamanlarında güvenilir nesne saptaması yapılabilecektir.



Şekil 3. 7. Renk Kodlu Tarama Düzlemleri 1)Dikey açıklık açısı 2)Dört tarama düzleminin biri 3)LD-MRS

LD-MRS üzerindeki foto diyot alıcılar her düzlem için 4 bağımsız alıcı olacak şekilde yapılandırılmıştır. Bu dört alıcı, çoklu katman teknolojisini oluşturur. Bir alıcı bir düzleme atanarak taranan alan 4 açısal bölgeye ayrılır. Bu dört düzlem geçmeli (ağ şeklinde) taranır. Bu demek oluyor ki; 2 düzlem eş zamanlı olarak devamlı tarama yapar (önce sarı ve yeşil düzlem, sonra mavi ve kırmızı düzlem).

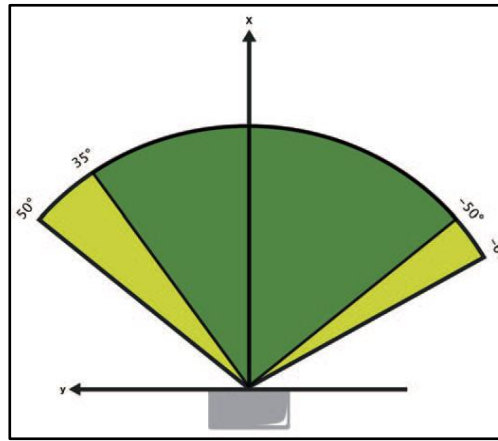
Sinyallerin eko(yankı) durumları ise Çizelge 3.3.'te gösterilmiştir.

**Çizelge 3. 3.** Sinyal Yankı Durumu

Plane	Echo 1	Echo 2	Echo 3
yellow	scan plane 4	scan plane 4	scan plane 4
green	scan plane 3	scan plane 3	scan plane 3
blue	scan plane 2	scan plane 2	scan plane 2
red	scan plane 1	scan plane 1	scan plane 1

Burada lazer ışının yüzeylerden geri dönüş durumları gösterilmektedir; renkler tarama düzlemlerini, renk tonundaki bozulma yankıları temsil etmektedir. Her düzlemin tanımlı bir rengi vardır. Hava ve yüzey koşullarına bağlı olarak renk tonu ekodan ekoya azalır. Örneğin lazer ışını cam tabakaya vurduğunda bir kısım ışın geri yansır, büyük bir kısmı geçerken, ışının belki bir kısmı da yağmur damlasından yansır. Üçüncü ölçüm değerine göre (eko 3) kalan ışın, objeden yansımaktadır.

### 3.2.3.Tarama Alanı ve Açı-Alan ilişkisi



**Şekil 3. 8.** Tarama Alanı 1)Merkezi çalışma aralığı(yeşil), 2)Yanal tarama alanı(açık yeşil),3)LD-MRS

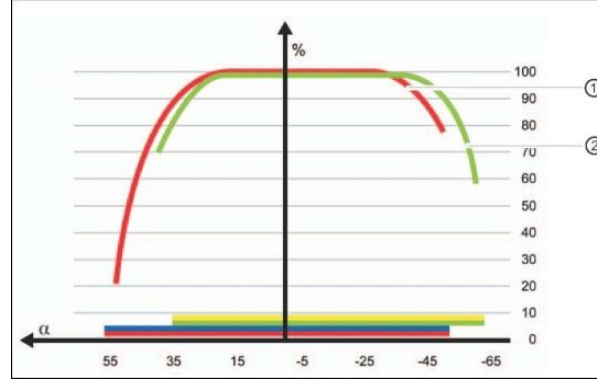
-50° ~ +35° arası 4. katman birden

-60° ~ +50° arası sadece 3. ve 4. katman çalışmaktadır.

Lazer tarayıcı merkezi 85° tarama aralığında dört katman aynı anda çalışmaktadır.



Tarama aralığı  $+35^{\circ}$  den  $+50^{\circ}$  ye veya  $-50^{\circ}$  ve  $-60^{\circ}$  arasında artırılarak toplamda  $110^{\circ}$  'lik bir aralığa genişletilebilir. Yanal tarama 4 tarama düzlem yerine iki tarama düzleminde gerçekleşir. LD-RMS'in optik yapısına göre tarama alanı tarama açısına bağlıdır(Şekil 3.9.).



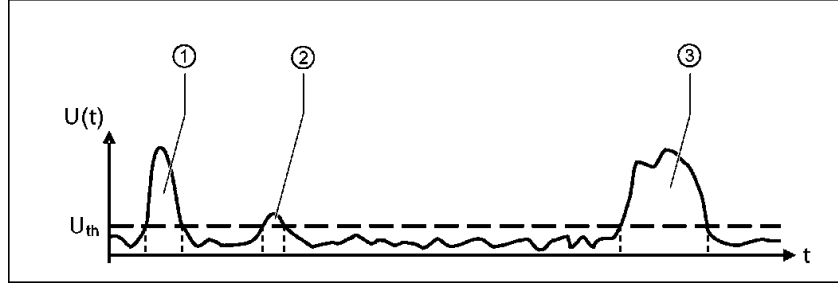
**Şekil 3. 9.** Tarama mesafesi açılı ilişkisi, 1)Üstteki düzlemlerin eğrisi, 2)Altındaki düzlemlerin eğrisi

### 3.2.4.Filtre

Gürültü filtresi (clutter=yığın) yağmur, rüzgar, toz gibi atmosferik nedenlerden dolayı oluşan sinyal bozulmalarını azaltır. Filtre tarama verilerini sınıflandırır ve normal ölçümleri gürültüden ayırır. Filtre değerlendirme alanı ve çıkış ölçümlerini etkiler. LD-RMS 4 tane tarama düzlemine(katmana) sahiptir. Her ikinci ölçümde diğer katman yerini alana kadar yaklaşık 15 m (49.2 ft) mesafeden hassasiyet düşürülerek ölçüm gerçekleşir.

### Sadece Son Eko Filtresi

Sadece Son Eko Filtresi ile sadece son ekonun büyüklüğü ölçülür. Örneğin verilen enerjinin ilki veya ikincisi camdan veya yağmur damlasından yansiyorsa son eko objenin üzerine düşer böylece gerçek nesne ölçülür.



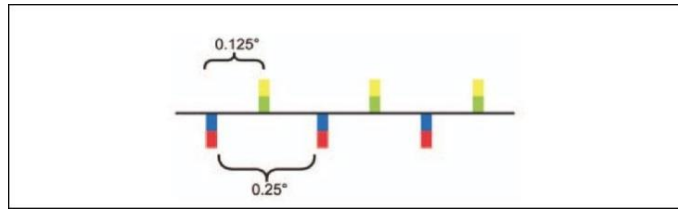
**Şekil 3. 10.** Lazer Darbesine ait örnek üç eko 1)Cam Panel ekosu, 2)Yağmur damlası ekosu, 3)Nesne ekosu

### 3.2.5. Açısal Çözümleme ve Tarama Frekansı

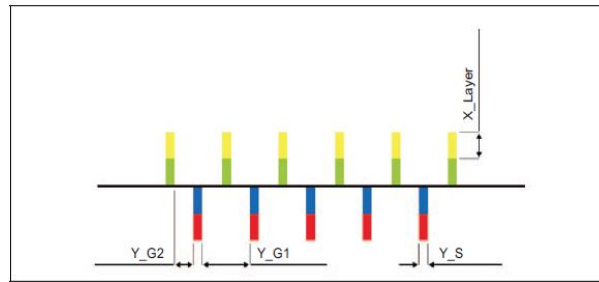
LD-RMS, 3 farklı tarama frekansına sahip olmakla birlikte(12,5 Hz., 25 Hz. ve 50 Hz.) kullanıcı bu parametreleri değiştirebilir.

#### Açısal Çözümleme

2 tarama düzleminden herbiri anlık olarak taranarak ölçülür ve analiz edilir. Belirli bir aralık için  $0,125^{\circ}$  lik açısal çözünürlük verilirse, 2 düzlem arasında  $0,125^{\circ}$  lik açısal adım oluşur.



**Şekil 3. 11.** Açısal Çözümleme



**Şekil 3. 12.**  $0,25^{\circ}$  ve  $d = 25$  m (82 ft)mesafede Açısal Çözünürlük

Y\_G1 bir ölçüm düzleminde ölçülen noktalar arasındaki mesafe ( Y\_G1 = 0.1833 m)

Y\_G2 İki lazer darbesi arasındaki mesafe (Y\_G2 = 0.0742 m)

Y\_S ölçülen noktanın genişliği point (Y\_S = 0.0349 m)

X\_Layer ayrıca ölçülmüş nokta yüksekliği (X\_Layer = 0.3491 m)

Aşağıdaki Çizelgeler örnek olarak, bazı değerleri göstermektedir:

**Çizelge 3. 4.** 0.125° Açısal Çözünürlük ile Tarama Verileri

Uzaklık d [m]	Y_S [m]	Y_G1 [m]	Y_G2 [m]	X_Layer [m]
10	0.0140	0.0297	0.0079	0.1396
25	0.0349	0.0742	0.0196	0.3491
50	0.0698	0.1484	0.0393	0.6981
100	0.1396	0.2967	0.0785	1.3963

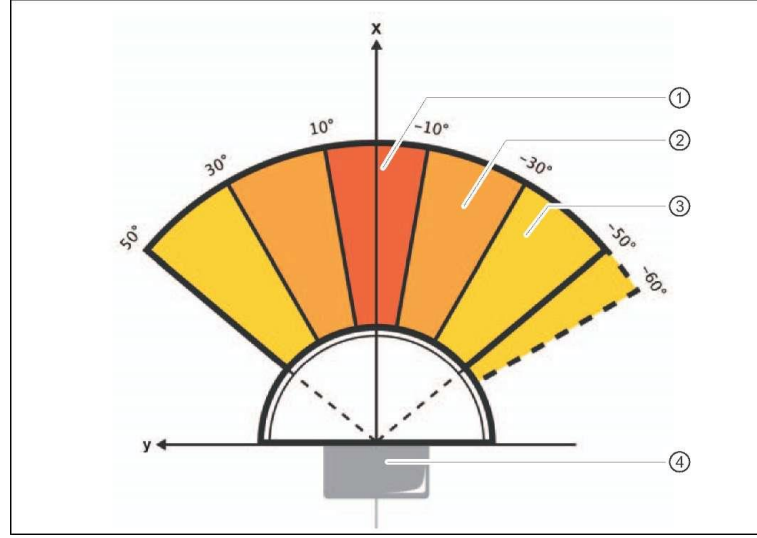
**Çizelge 3. 5.** 0.25° Açısal Çözünürlük ile Tarama Verileri

Uzaklık d [m]	Y_S [m]	Y_G1 [m]	Y_G2 [m]	X_Layer [m]
10	0.0140	0.0733	0.0297	0.1396
25	0.0349	0.1833	0.0742	0.3491
50	0.0698	0.3665	0.1484	0.6981
100	0.1396	0.7330	0.2967	1.3963

**Çizelge 3. 6.** 0.5° Açısal Çözünürlük ile Tarama Verileri

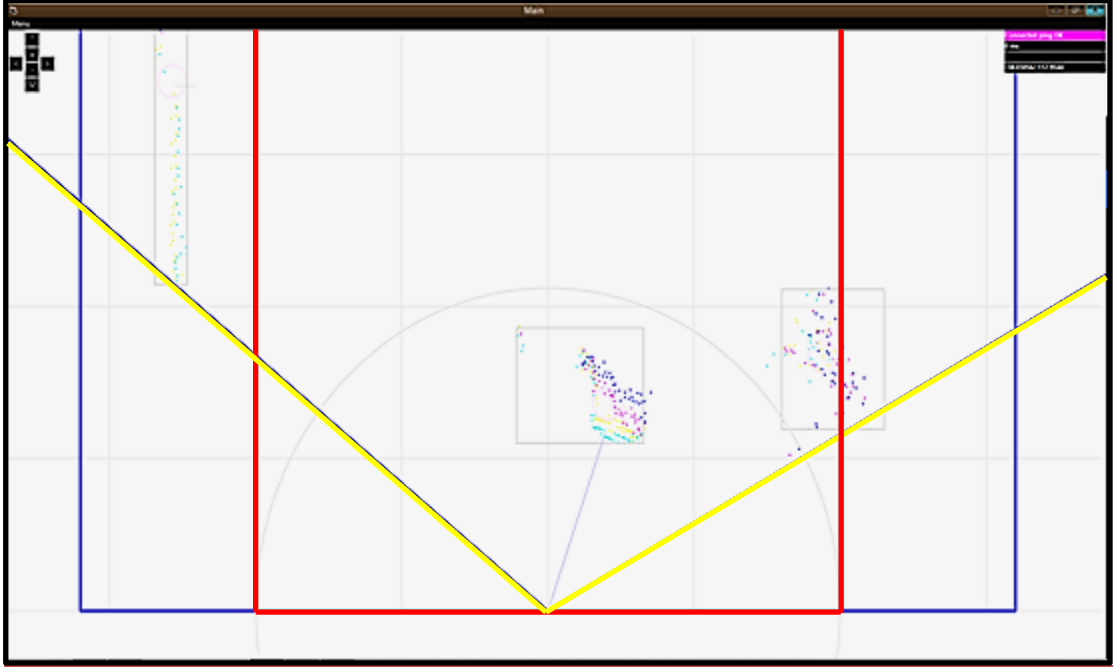
Uzaklık d [m]	Y_S [m]	Y_G1 [m]	Y_G2 [m]	X_Layer [m]
10	0.0140	0.1606	0.0733	0.1396
25	0.0349	0.4014	0,01833	0.3491
50	0.0698	0.8029	0,3665	0.6981
100	0.1396	1.6057	0,7330	1.3963

Ölüm modunda tarama frekansı 12,5 HZ. dir. Alan taramalarında kullanılmak istenirse sabit açı taraması ile sektör değiştirilerek yapılabilir. Tarama frekansı 25 HZ. ile yapılır. 50 Hz.de yalnızca sabit açı çözümlemesi yapılır.



**Şekil 3. 13.** Sektörlere göre değişik Açısal Çözünürlük verileri, 1)Merkezi alanın 0.125° çözümlemesi, 2)Orta alanın 0.25° çözümlemesi, 3)Yanal alanın 0.5° çözümlemesi, 4)LD-MRS

Sensörün x-ekseninin merkezinde açısal çözünürlük  $\pm 10^\circ$  merkez alandır. x-ekseni  $\pm (10^\circ$  ila  $30^\circ)$  orta alanında biraz daha az bir açısal çözünürlük uygulanır. Yanal alan  $+50^\circ$ 'den  $+30^\circ$ 'a ve  $-30^\circ$ 'dan  $-60^\circ$  a nesnelere daha az alakalı olduğundan daha düşük bir açısal çözünürlüğe sahiptir. Renkler tarama düzlemlerini göstermektedir. Sarı çizgiler tarama açısını ve kırmızı çizgiler ise tehlikeli bölgeyi göstermektedir.



**Şekil 3. 14.** Noktaların Koordinat Sisteminde Çizilmiş Durumu

Bu yazılımda lazer cihazının fiziksel özelliği dolayısıyla sol taraftaki 15 derecelik kısımda ve sağ taraftaki 10 derecelik kısımda %10 yansıma kaybı yüzünden sadece 2 katman çalışırken orta bölgedeki 85 derecelik kısımda 4 katman birden çalışmaktadır.

*Bu aşamadan sonra gelen sinyallerin filtrelenerek ayrıştırılması sağlanacaktır. Bu amaçla çeşitli filtre algoritmaları kullanılmaktadır.*

### 3.2.6. Sistem Analizinde Kullanılan Filtre Çeşitleri

#### 3.2.6.1. Aritmetik ortalama filtresi

Elde edilen son “n” kadar nokta mesafesi değerlerin aritmetik ortalaması alınarak işlemlere alınması. Yani her noktanın mesafesinin ardışık olarak yapılan okumalarının farklı olması nedeniyle aritmetik ortalamasından yararlanma prensibine dayanır.

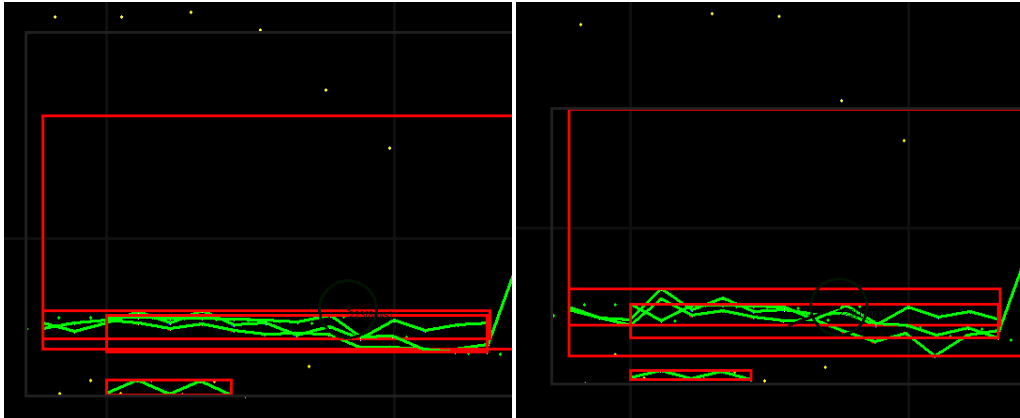
#### 3.2.6.2. Hata oranı filtresi

Her ölçü cihazında olduğu gibi lazer tarayıcıda da mesafe ölçüm hataları bulunmaktadır. Kullanılan lazer tarayıcıda;

Ölçüm çözünürlüğü : 40 mm

İstatistiksel hata (1 sigma) : 100 mm olarak verilmiştir.

Elde edilen en son nokta mesafesi, elde edilmiş önceki son mesafe değeri arasındaki farkı bulunur. Eğer elde edilen sonuç hata oranından daha küçük ise, son okunan nokta mesafesi göz ardı edilir. Böylece hata filtrelenmiş olur.

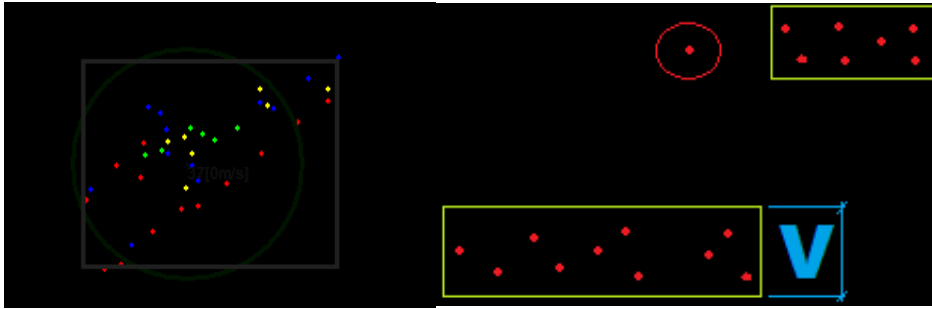


Şekil 3. 15. Arda arda yapılan iki ölçüm hatası

### 3.2.6.3. Kalman filtresi

Kalman filtresi 1960 yılındaki ilk sunumundan bu tarafa, geliştirilen binlerce askeri ve sivil yön bulma sistemlerinin ayrılmaz bir parçası olmuştur. Bu görünüşte basit, özimizelemeli dijital, algoritmik filtre, sistemin genel performansını elde etmek için navigasyon verileri üzerinde uygun bir kaynaşma sağlaması ile ünlü olmuştur. Yapılan yazılımda çok hızlı araç hareketinde aritmetik ortalama, daha yavaşta kalman ve en yavaşta hata oranı filtresi kullanılması düşünülmektedir. Ancak gerçek ortam denemeleri ile bunlar değişebilir.

Filtreleme işleminden sonra ise artık nesnenin oluşturulması aşaması başlamaktadır. Tespit edilen noktalardan, mesafe bilgisi göz önünde bulundurarak nesnelere oluşturulur. Bunun için çeşitli kurallar oluşturulmuştur. Aşağıdaki Şekil7 üzerinden bu kurallar sırasıyla açıklanmıştır.

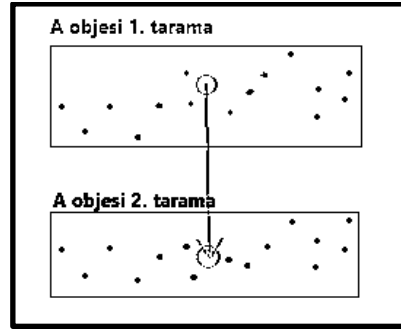


Şekil 3. 16. Örnek Nesne Oluşturma

Nesne oluşturma kuralları:

- İki komşu nokta mesafe değeri farkı (şekilde “v” değeri), önceden girilmiş değerden büyük değil ise
- Yan yana tespit edilen noktalar dışında, önceden girilmiş pas geçme nokta sayısından büyük ise (şekilde kırmızı çember ile işaretlenen nokta)
- Bir nesnede en az bulunması gereken nokta sayısı
- Nesne boyutları, nesneyi oluşturan nokta sayısı, ağırlık merkezi, merkeze en yakın nokta v.b. veriler ile nesne tanımlanır.

Bilindiği gibi nesnenin oluşturulması önemli bir aşamadır. Ancak projenin tramvaylar için uygulanacak olması nedeniyle nesnelerin hareketli olup olmamaları da önemlidir. Bu aşamada nesne hareketleri için bir algoritma hazırlanmıştır. Bir nesnenin hareketini tespit edebilmek için, tespit edilen nesne, sonraki taramada tekrar tespit edilip önceki nesne ile eşleştirilmesi gerekir. Her taramada nesnelere arasında bağ, nesneyi oluşturan noktalar göz önünde bulundurularak kurulur. Nokta sayısı, noktalar arasında mesafe, nesne çevresi, nesne ağırlık merkezi son bulunan konum ile yeni tespit edilen konum arasındaki kabul edilebilirlik mesafesi, tarama hızı ve hareket hızı göz önünde bulundurularak nesnelerin sürekliliği tespit edilmeye çalışılır.



**Şekil 3. 17.** Nesne Hareket Tespit Algoritması

### Veri türü 0x2221

Bu veri türü başlangıcı algılandığında lazer tarayıcıda, taranan ve oluşturulan nesne verisi hazır demektir. Veriler “little endian” biçiminde kodlanmıştır.

Bu veri türünde tarama zamanı baz alınarak algılanan nesnelere ait konum ve yön değiştirmelerine ait bilgiler değerlendirilir.

**Çizelge 3. 7.** Okunan Veri Paketi İçeriği

Byte	İçerik	Veri tipi	Açıklama
0	Tarama zamanı	NTP64	Tarama zamanı. Her taramada güncellenir.
8	Nesne sayısı	UINT16	Nesne sayısı
10	Taranan nesne listesi	Nesne	Taranan nesne dizisi.



**Çizelge 3. 8.** Nesne Dizi Formatı

Byte	İçerik	Veri tipi	Açıklama
0	Nesne kimliği	UINT16	İzlenen nesne kimliği
2	Nesne yaşı	UINT16	Takip edildiğinden itibaren tarama sayısı.
4	Nesne tahmini yaş	UINT16	Takip edilen nesnenin tahmini yaşı.
...	...	...	...
8	Referans noktası	Point2D	Takip edilen nesnenin referans noktası(ağırlık merkezi). Referans dizi formatında.
...	...	...	...
16	En yakın nokta	Point2D	Takip edilen nesnenin lazer tarayıcıya en yakın noktası.
20	dikdörtgenin merkez noktası	Point2D	Nesne dikdörtgen merkez noktası.
24	dikdörtgenin boyutları	Size2D	Nesne-dikdörtgen boyutları.
...	...	...	...
36	Nesne yön belirleme	INT16	Nesnenin koordinat sisteminde 1/32 °
38	Nesne hızı	Point2D	Nesnenin X ve Y koordinat sisteminde cm/s cinsinden hızı.
...	...	...	...
56	Çevre nokta sayısı	UINT16	Nesneyi çevreleyen noktaların sayısı
58	Çevre noktaları listesi	Point2D	Çevre noktaları dizisi.

**Çizelge 3. 9.** Referans Dizi Formatı (Point2d)

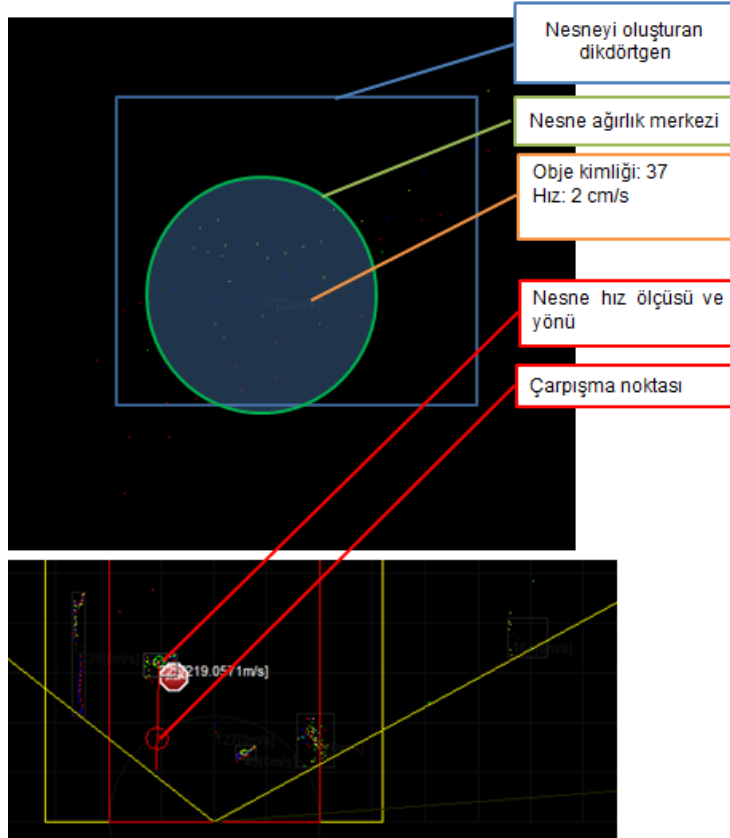
Byte	İçerik	Veri tipi	Açıklama
0	X noktası	INT16	X noktası
2	Y noktası	INT16	Y noktası

**Çizelge 3. 10.** Boyut Dizi Formatı (Size2d)

Byte	İçerik	Veri tipi	Açıklama
0	X genişliği	INT16	Genişlik
2	Y yüksekliği	INT16	Yükseklik

### 3.3.Nesnelerin Çizdirilmesi

Üstte açıklanan Çizelgeler doğrultusunda, nesne verileri değişkenlere atanarak çizdirme fonksiyonu başlatılıyor. Çizdirme öncesinde çarpışma hesaplamaları için yine filtreleme kullanılmaktadır.

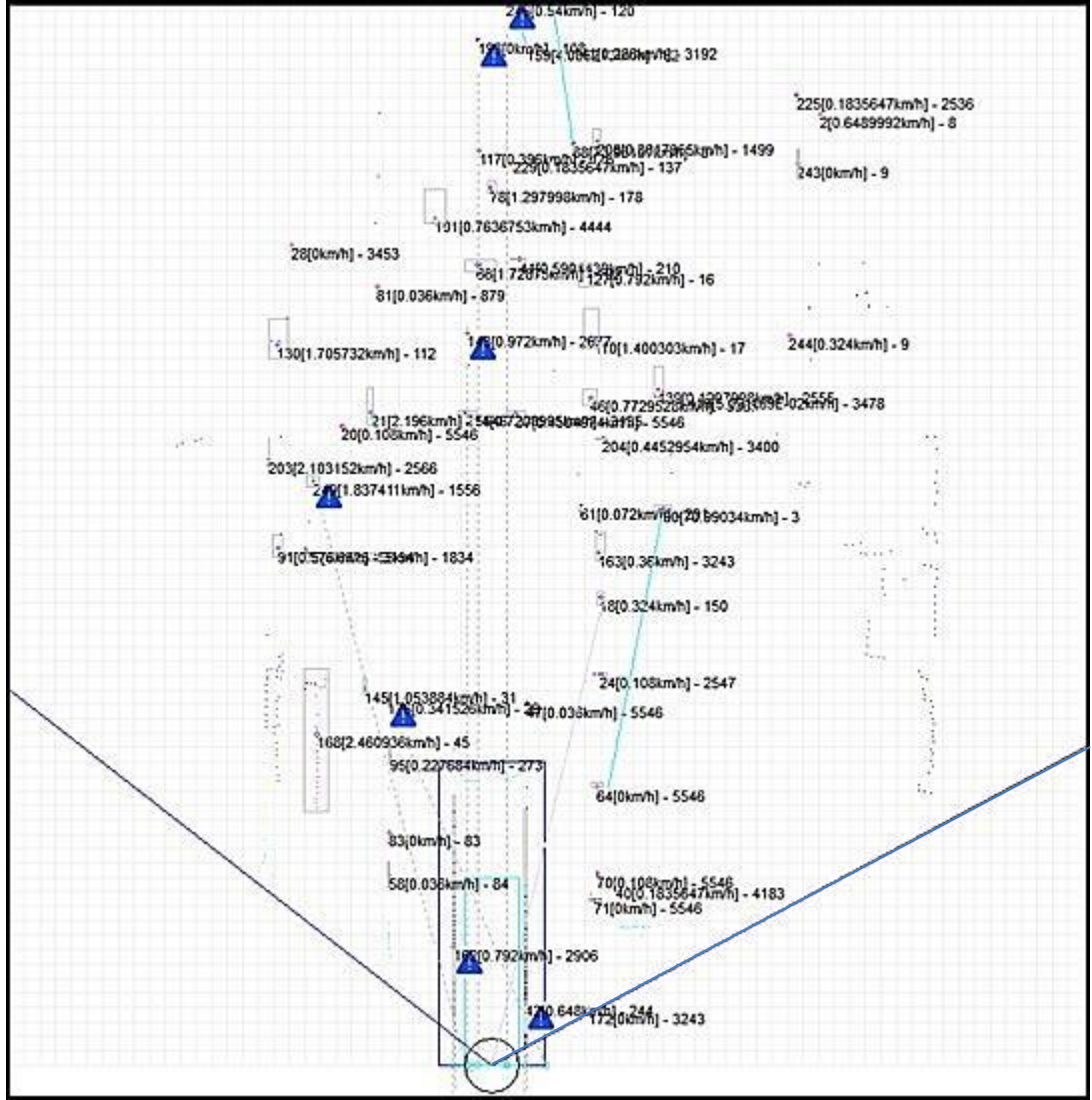


Şekil 3. 18. Nesne Veri Türü Tespiti Program Görüntüsü

### 3.4. Filtreleme

Çarpışma hesaplamaları için tehlike alanı içerisine giren nesnelerin hareket bilgileri çeşitli filtreleme teknikleri ile işleme tabi tutularak, çizdirme öncesinde tehlike analizi yapılır ve lazer tarayıcı merkezi (araç) göz önünde bulundurularak çarpışma olasılıkları elenir. Bu filtreler; hız, yön ve yaş sınırı(nesne varlık kontrolü) filtreleridir.

### 3.4.1.Filtresiz Ekran Durumu



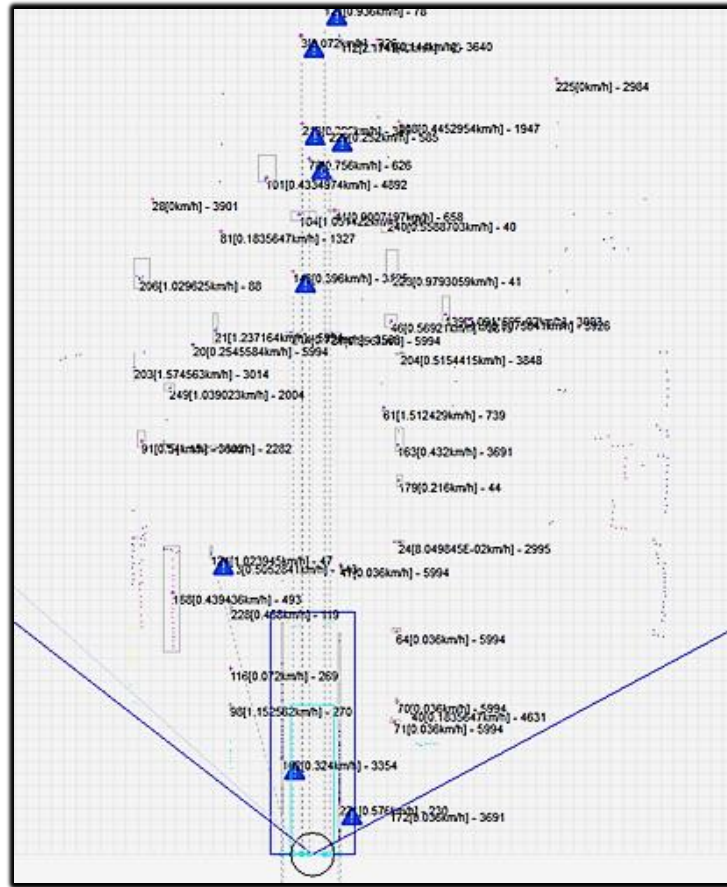
Şekil 3.19.Filtresiz Ekran görüntüsü

Yazılımla yapılan filtrelerin tümü devre dışı bırakıldığında ekran görüntüsü Şekil 3.19'da verildiği gibi olmaktadır. Şekilden de anlaşılacağı gibi tramvayın önündeki her şey bir tehlike gibi algılanmakta ve sürücü ve/veya tramvayın fren tertibatı bu tehlike algısına göre sürekli uyarılmaktadır. Bu durumun kazaları azaltıcı değil aksine arttırıcı etkisi olacaktır.

### 3.4.2. Yaş Sınırı Filtresi

Taranan yatay düzlemde her taramada onlarca/yüzlerce nesne tespit edilmektedir. Çoğu nesne oluşan gürültülerden veya tarayıcı hata oranından dolayı yaşamını (sürdürülebilirliğini) bir kaç taramadan fazla sürdüremez. Bu tür nesnelere elemek için yaş sınırı filtresi kullanılmaktadır.

*Nesne(i).nesneyasi < en az yaş sınırı elenir.*



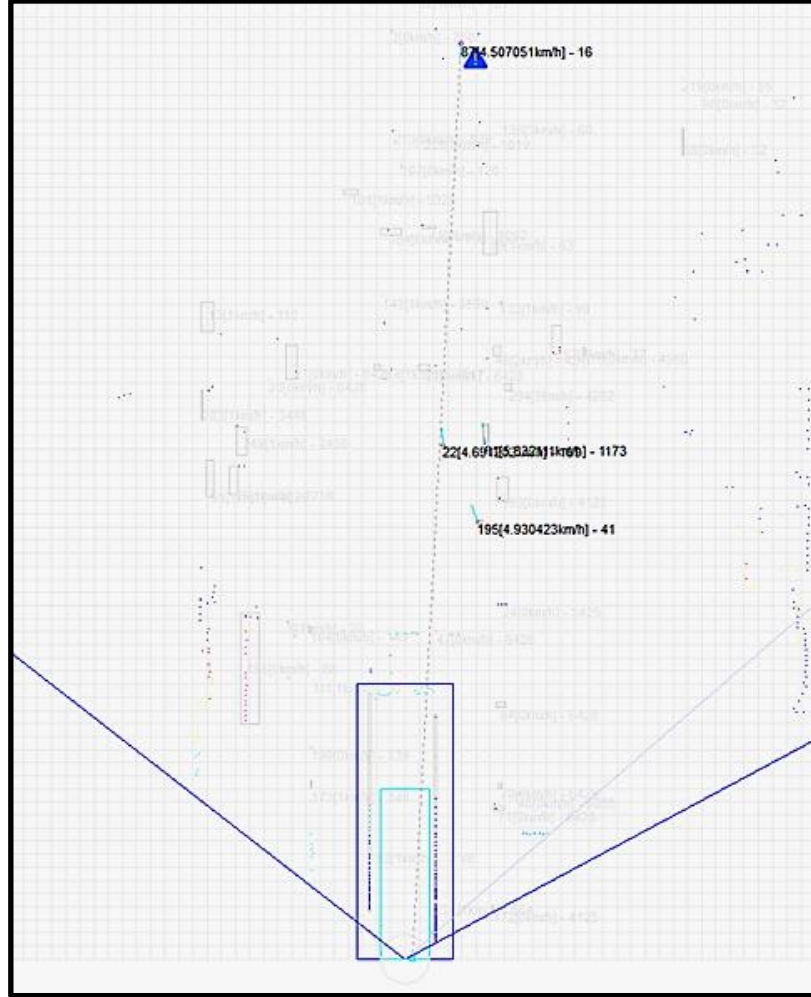
Şekil 3. 20. Yaş Sınırı Filtreli Ekran Görüntüsü

Filtre devreye alındığında Şekil 3.20.'de verilen görüntü ortaya çıkmaktadır. Burada tramvayın geçiş güzergahında sürekli hareketsiz duran cisimler bir önceki zamanda da orada hareketsiz durmaları dolayısıyla tespit edilir ve sisteme yanlış uyarı verilmesinin önüne geçilmiş olur.

### 3.4.2.Hız filtresi

Taranan çoğu nesne oluşan gürültülerden veya tarayıcı hata oranından dolayı sürekli hareket halindedir. Bu tür nesneleri elemek için hız filtresi kullanılmaktadır.

*Nesne(i).hizi < en az hız sınırı elenir.*



Şekil 3. 21.Hız Filtreli Ekran Görüntüsü

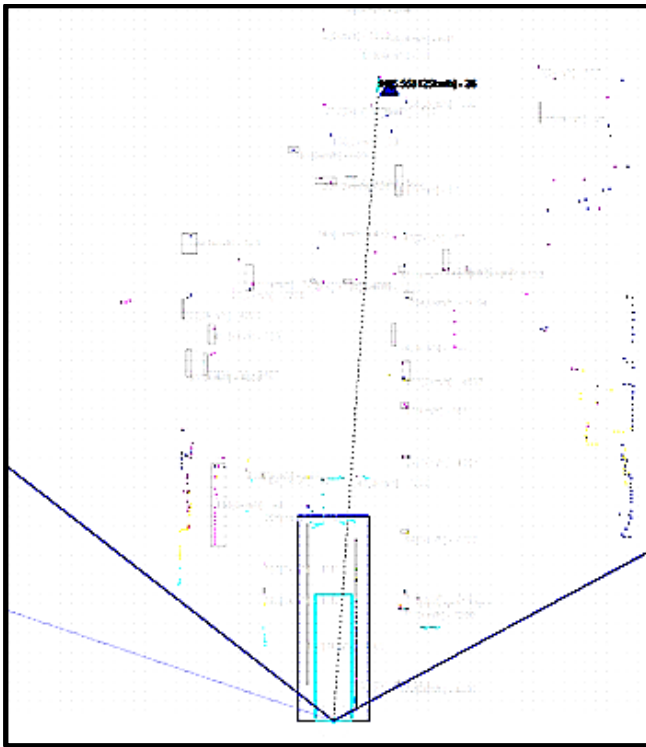
### 3.4.3.Yön filtresi (X,Y koordinatları)

Hareket eden nesnenin 'X' ve 'Y' yönü lazer tarayıcı merkezi (araç) göz önünde bulundurularak nesnenin lazer merkezi sınırları içerisinde olup olmadığı ve yönünün durumuna göre çarpışma olasılığı elenir.

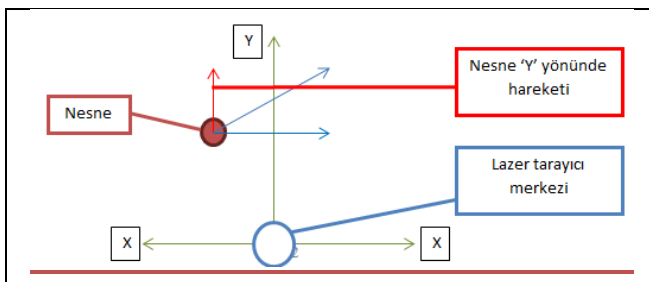
*Nesne(i).Y\_yönü > 0 elenir*

*Nesne(i).X < Lazer merkezi sınırları ve Nesne(i).X\_yönü < 0 elenir*

*Nesne(i).X > Lazer merkezi sınırları ve Nesne(i).X\_yönü > 0 elenir.*



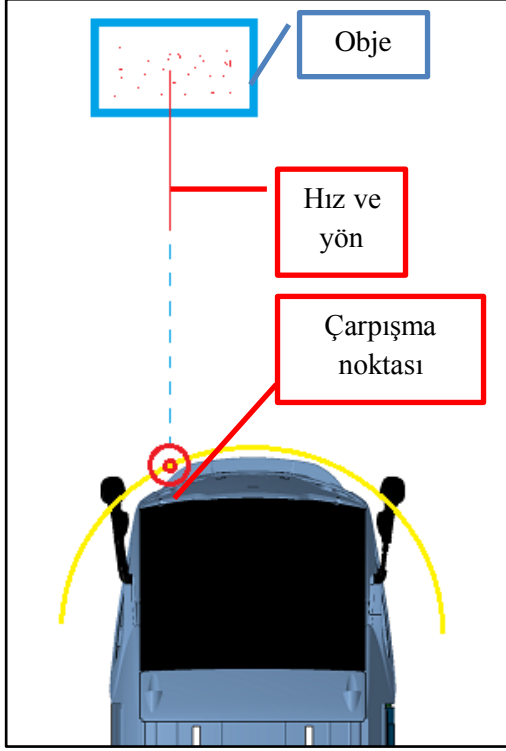
Şekil 3. 22.Yön Filtreli Ekran Görüntüsü



Şekil 3. 23. Nesnelerin Filtrelenmesi

### 3.5. Çarpışma Olasılığının Değerlendirilmesi

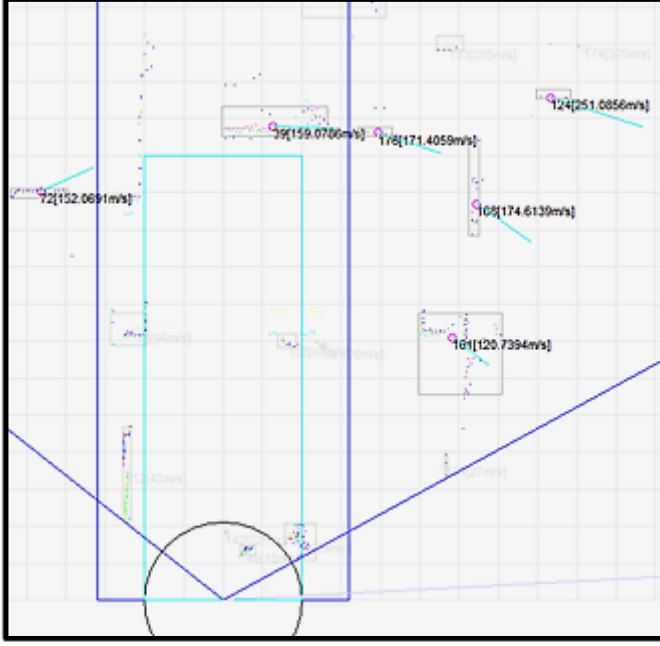
Nesne hareket yönü ve hızı tespit edildikten sonra, araç boyutları göz önünde bulundurularak çarpışma olasılığı hesaplanır. Şekil 6.7'ye göre olası çarpışma noktası kırmızı daire ile gösterilmiştir.



Şekil 3. 24. Çarpışma Olasılığının Değerlendirilmesi

### 3.5.1. Çarpışma olasılığı yok

Tespit edilen nesnelerin hareket yönü ve hızı, çarpışma olasılığı içermiyor. Şekil 3.25.'te tespit edilmiş 6 nesnenin hız ve yön bilgisi, nesne merkezinden çıkan kırmızı oklar yardımı ile gösteriliyor. Nesnelerin hız ve yönlerinin hesaplamalar sonucu araç ile çarpışmanın olasılıksız olduğu belirleniyor. Hiçbir çarpışma uyarısı verilmiyor.

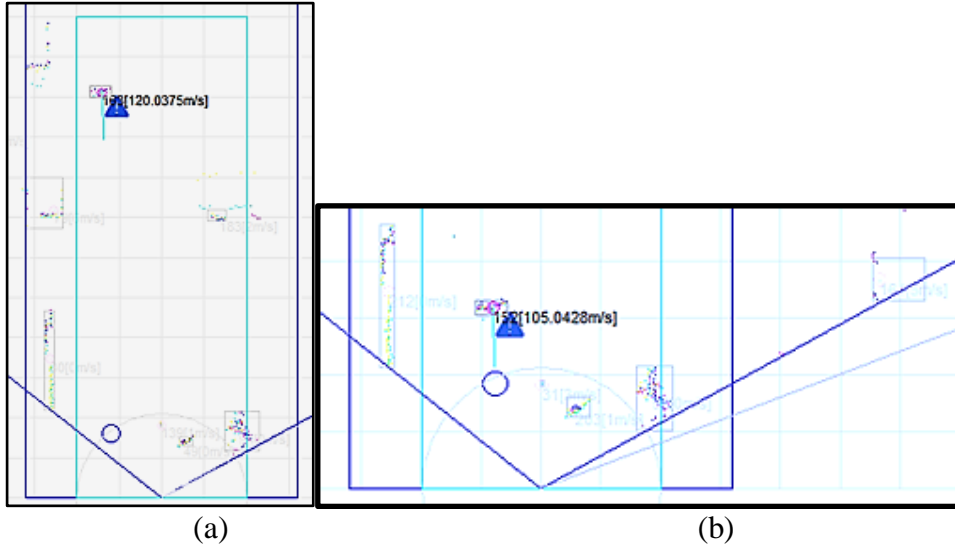


Şekil 3. 25. Çarpışma Olasılığı Yok



### 3.5.2. Çarpışma olasılığı var

Tespit edilen nesnenin hareket yönü çarpışma olasılığı olduğunu gösteriyor, fakat nesnenin mesafesi uzak ve hızı düşük olduğundan sürücü uyarılıyor. Nesnenin mesafesine göre sesli uyarı tekrarı artıyor.

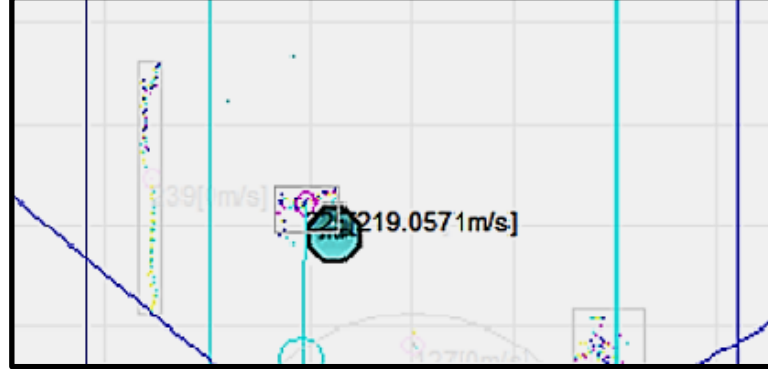


**Şekil 3. 26.** Çarpışma Olasılığı Var.

Şekil 3.26(a)' da takibe başlanan nesne Şekil 3.26(b)'de yaklaştığını görüyoruz. Sarı daire ile nesnenin olası çarpışma noktası görüyoruz. Çarpışma olasılığı bulunan nesnelerin üzerinde ayrıca dikkat-ünlem işareti belirlemektedir.

### 3.5.3. Çarpışma olasılığı çok yüksek

Nesne ile çarpışma olasılığı çok yüksek olduğu sürücüye görsel ve sesli mesaj ile iletiliyor.



Şekil 3. 27. Çarpışma Olasılığı Çok Yüksek

Hesaplamalar sonucu çarpışma olasılığı yüksek nesnenin çarpışma noktası Şekil 3.27'de görüldüğü üzere kırmızı daire ile çizilmiş, ayrıca nesne üzerinde “stop” işareti çizdirilmiştir.

## Görüntü Üzeride İşleme

Lazer tarayıcıdan elde edilen veriler, gerçek zamanlı görüntü üzerinde çarpışma olasılıkları sürücüye gösterilecektir.Şekil 3.28.'de görünen 2 nesne ile çarpışma olasılığı tespit edilmiştir.



Şekil 3. 28. Olası Çarpışma Zamanı

Hesaplamalar sonucunda

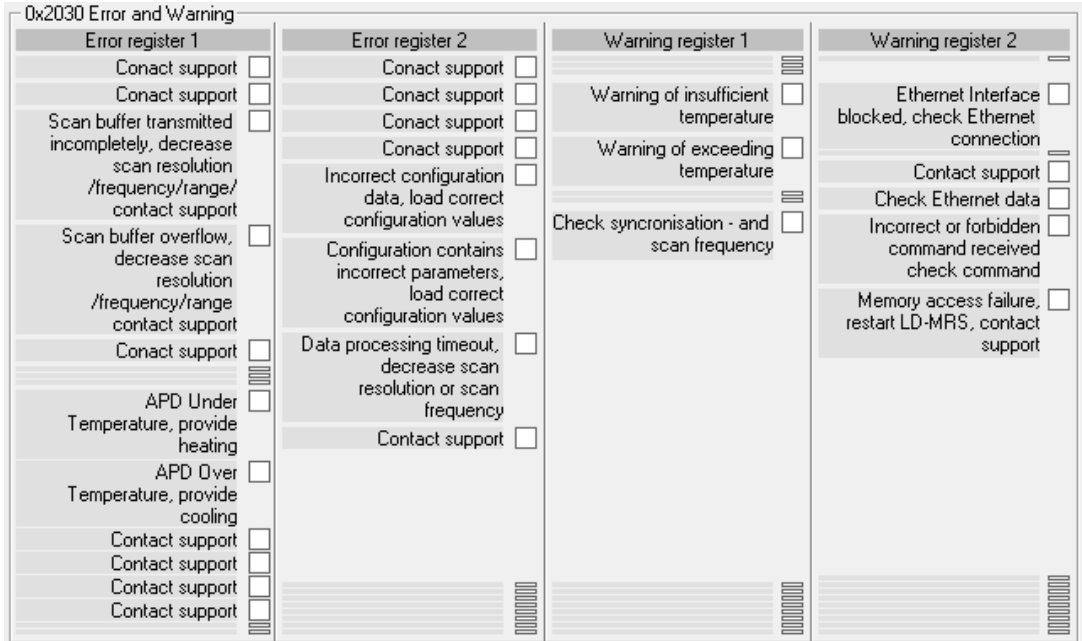
- Otobüs hızı ve tramvay hızı göz önünde bulundurularak çarpışma noktası sarı daire ile çizilmiştir, “1 saniye sonra çarpışma olasılığı” sürücüye görüntü üzerinde işlenmiştir.
- Köpek hızı ve tramvay hızı göz önünde bulundurularak çarpışma noktası sarı daire ile çizilmiştir, “3.5 saniye sonra çarpışma olasılığı” sürücüye görüntü üzerinde işlenmiştir.

## Veri türü 0x2030

Lazer tarayıcı bir hata algıladı ya da bir uyarı yayınlamak ister ise en kısa sürede bu mesajı gönderir. Hatalar ve uyarı bitleri bu mesajı gönderdikten sonra sıfırlanır. Bu mesaj süresince uyarılar ve hatalar devamlı-periyodik olarak gönderilmektedir. Veriler “little endian” biçiminde kodlanmıştır. Verilerin içerikleri ve ekran çıktıları aşağıda Şekil 3.29.’da gösterilmektedir.

Çizelge 3. 11. Veri içerikleri

Byte	İçerik	Veri tipi	Açıklama
0	Hata kayıtları 1	16 bitlik veri	
2	Hata kayıtları 2	16 bitlik veri	
4	Uyarı kayıtları 1	16 bitlik veri	
6	Uyarı kayıtları 2	16 bitlik veri	



Şekil 3. 29. Verilerin içerikleri ve ekran çıktıları

## Veri türü 0x2030

Lazer tarayıcına komut göndermek için veri türü 0x2010 kullanılır. Lazer tarayıcı 0x2020 ile komuta cevap verir. Veriler “little endian” biçiminde kodlanmıştır. Gönderilen veriler(ayarlar) Şekil 3.30’da gösterilmektedir.

**Çizelge 3. 12.** Gönderilen Veriler(ayarlar)

Byte	İçerik	Veri tipi	Açıklama
0	Komut kimliği	UINT16	Komut dizi formatı
2	...	...	
4	Komut verisi	Komuta göre değişir	Komuta göre değişir

Komut dizi formatı:

**2.3.1 Hata sıfırla**– Hataları tekrar kontrol et.

**2.3.2 Durum bilgisi** – Tarayıcı genel durum bilgisi okunur (Tarama açıları, iç sıcaklık, v.s.).

**2.3.3 Ayarları cihaza kaydet**– Gönderilen parametreler tarayıcı kalıcı belleğine kaydedilir.

**2.3.4 Parametreleri ayarla** – Parametreler geçici belleğe gönderilir.

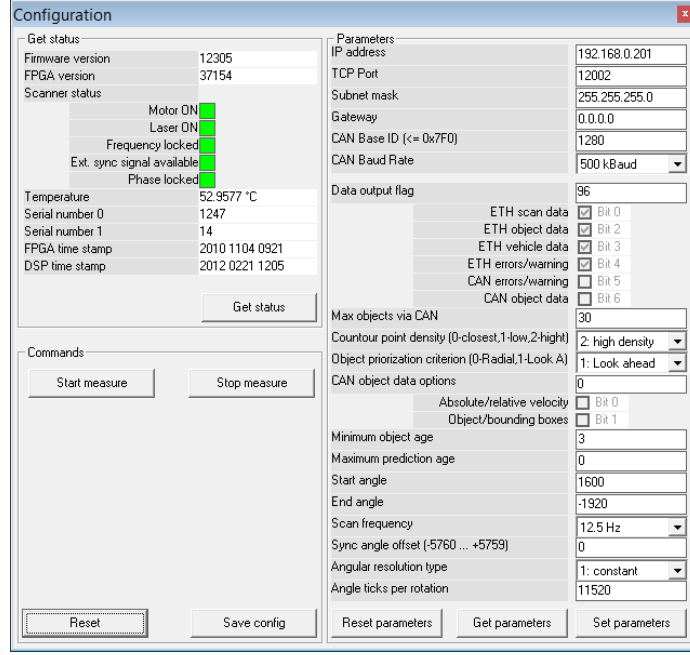
**2.3.5 Parametreleri oku** – Parametreler okunur.

**2.3.6 Fabrika ayarlarına geri dön** – Tüm ayarlar fabrika verilerine geri döndürülür.

**2.3.7 Ölçüme başla** – Tarama işlemini başlatır.

**2.3.8 Ölçümü durdur** – Tarama işlemini durdur.

**2.3.9 Zamanı ayarla** – Tarayıcı zamanı ayarla



Şekil 3. 30. Gönderilen veriler(ayarlar)

Çizelge 3. 13. Haberleşme protokolü örneği

Byte	İçerik	Veri tipi	Açıklama
0	Sihirli kelime	UINT32	Paket başlangıcı 0xAF FEC0 C2
4	Bir önceki mesaj büyüklüğü	UINT32	Bir önceki pakette gönderilen mesajın büyüklüğü 0x00000000
8	Bu mesajın büyüklüğü	UINT32	Gönderilen mesajın büyüklüğü
12	Yedek	UINT8	0x00
13	Cihaz kimliği	UINT8	0x07
14	Veri tipi	UINT16	0x2010
16	NTP zamanı	UINT64	0x0000000000000000
24	Komut kimliği(parametre ayarla)	UINT16	0x0010 (kod "little endian" biçimine dönüştürülerek 0x1000 olarak gönderilir)
26	Yedek	UINT16	0x0000
28	Parametre indeksi(IP adres değişikliği)	UINT16	0x1000(kod "little endian" biçimine dönüştürülerek 0x0010 olarak gönderilir)
30	Parametre verisi(10.152.36.200)	UINT32	0x0A9824C8 (kod "little endian" biçimine dönüştürülerek 0xC824980A olarak gönderilir)

#### 4. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Filtreleme analizi ve çarpışma olasılıklarının değerlendirildiği Bölüm 3.4. ve bu bölümde yer verilecek test sonuçlarına göre lazer tarayıcı ile yol taraması gerçekleştirilirken bir filtrenin kullanımının yanıltıcı ve tehlikeli olabileceği, ancak tüm filtrelerin kullanımı ile doğru bir analiz yapılacağı sonucu ortaya çıkmaktadır. Yapılan tehlike analizlerinin sonucunda tehlikeli alana giren nesne için Çarpışma Tehlikesi Alarmı verildiğinde önce otomatik zil sesi uyarısı, çok tehlikeli alana girdiğinde ise otomatik frenleme sistemi devreye alınmaktadır.

Taranan nesne çizimi için yapılan yazılımda çok hızlı araç hareketinde her nokta mesafesinin ardışık olarak yapılan okumalarının farklı olmaları nedeniyle aritmetik ortalama filtresi kullanılmış, daha yavaş hızda sistemin genel performansını navigasyon verileri ile kaynaşmasını sağlayan ve çok sayıda gürültü içeren bir sistemin değişken değerlerini optimal olarak tahmin edebilen Kalman Filtresi[9] ve en yavaş hızda en son okunan verinin hata oranından küçük olması durumunda son verinin gözardı edilerek hatanın filtrelendiği Hata Oranı filtresi kullanılmıştır.

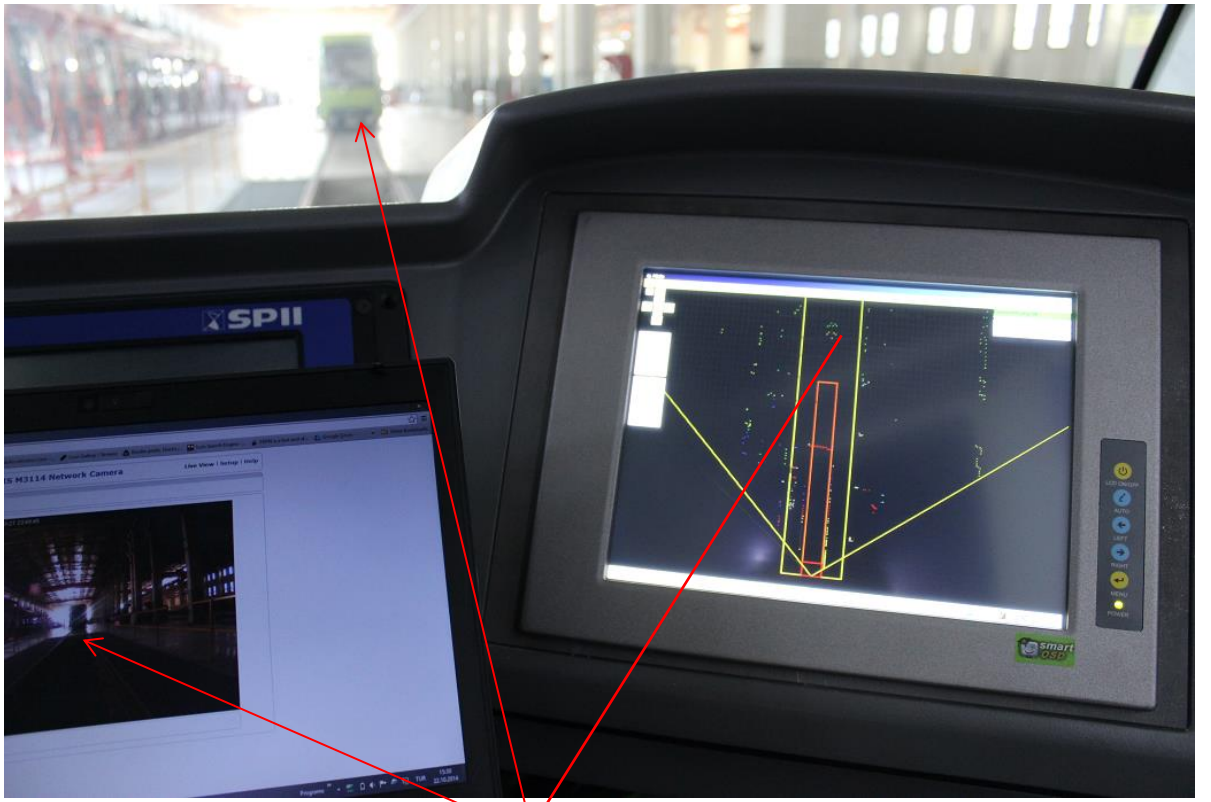
Sonuçta, tramvay üzerine monte edilen lazer tarayıcı donanım ile ona uyumlu yapılan yazılım birleştirilerek, şehir içlerinde tramvaylar ile diğer sistemler arasında olan kazaların ve/veya çarpışmaların önüne geçilmesi için önerilen sistem iyi bir şekilde çalışmaktadır.

## 4.1. Test Sonuçları

### 4.1.1. Test

#### - Aynı hattaki aracın hareketsiz iken ekran görüntüsü

- Aynı hatta başka bir demir yolu aracı varken; lazer tarayıcı sistemin sürücü ekranındaki görüntüsü Şekil 6.14.'te gösterilmiştir. Araç henüz tehlikeli alan olarak belirlenen turuncu alanın içerisinde değildir.



LRV Aracı.

Hız : 0 km/s

Şekil 4. 1. Hatta bulunan başka bir demir yolu aracı,  $V=0$  km/s.



- Hattaki aracın hızı  $V=2$  km/s. iken(filtreleme hızı olan 5km/s.altında) ekran görüntüsü

Önümüzdeki obje dikkat edilmesi gereken bölge olan sarı bölgenin içinde fakat henüz tehlikeli bölge olan kırmızı alanındışındadır.Hızımız da filtreleme hızın altında olduğu için( $2 \text{ km/s} < 5 \text{ km/s}$ ) henüz bir tehlike sayılmıyor.



Şekil 4. 2. Hattaki aracın hızı  $V=2$  km/s. iken(filtreleme hızının altında) ekran görüntüsü

- Hattaki aracın hızı  $V=5$  km/s. iken(filtreleme hızı 5km/s.ēitken) ekran görüntüsü

Önümüzdeki obje dikkat edilmesi gereken bölgenin içinde fakat tehlikeli bölgenin hala dışında, hızımız filtreleme hızın altında olduğu için( $5$  km/s  $<$   $5$  km/s) henüz bir tehlike sayılmıyor.



Şekil 4. 3. Hattaki aracın hızı  $V=5$  km/s. iken(filtreleme hızına eşitken) ekran görüntüsü

**- Hattaki aracın hızı  $V=6$  km/s. iken(filtreleme hızı aşıyor) ekran görüntüsü**

Önümüzdeki obje dikkat edilmesi gereken bölgenin içinde fakat tehlikeli bölgenin dışında, hızımız filtreleme hızın üstünde olduğu için( $6 \text{ km/s} > 5 \text{ km/s}$ ) otomatik zil sesi uyarısı devreye giriyor.



**Şekil 4.4.** Hattaki aracın hızı  $V=6$  km/s. iken(filtreleme hızı aşıyor) ekran görüntüsü, uyarı zili çalıyor.

- Hattaki Araç Tehlikeli Alan içerisinde ve hızı  $V=7$  km/s. iken ekran görüntüsü

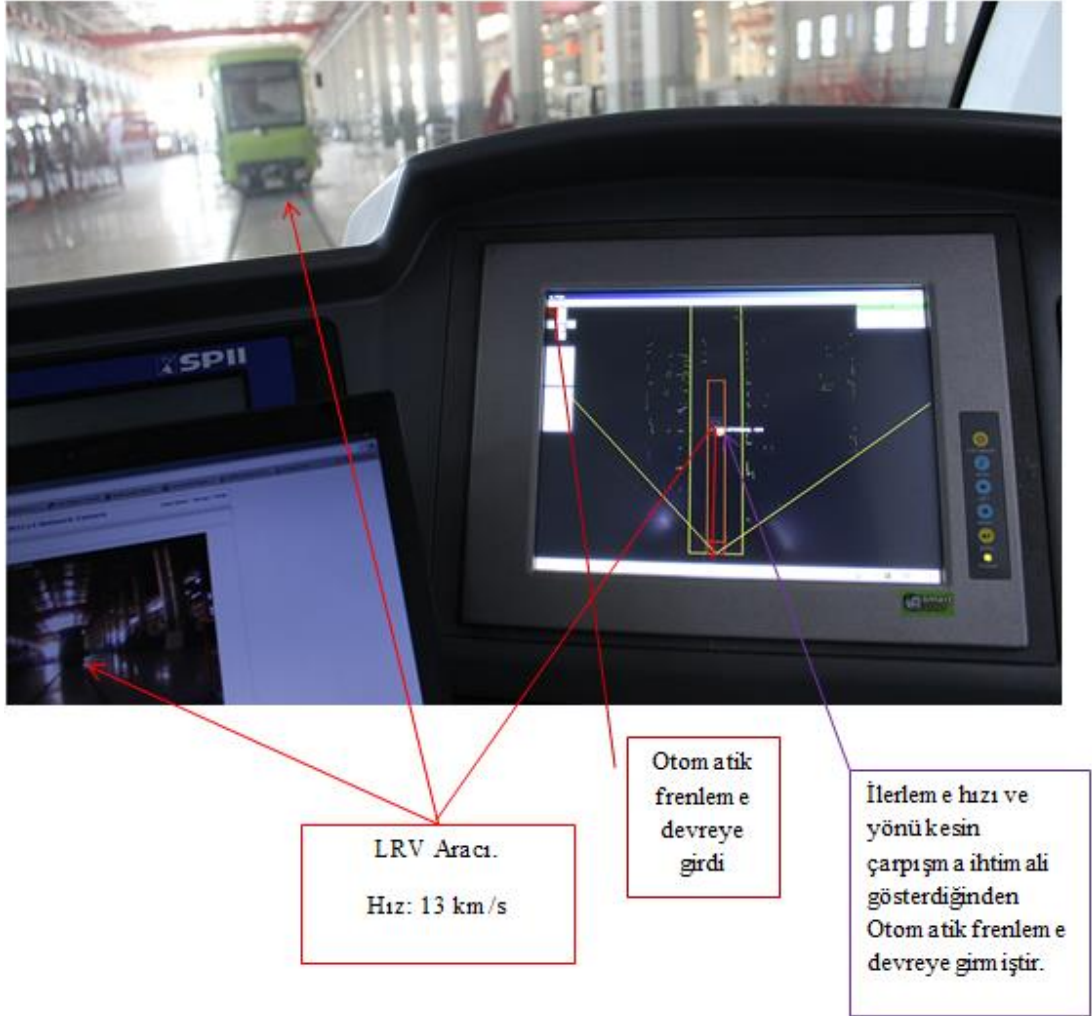
Tespit edilen önümüzdeki obje tehlikeli bölgenin içinde ve hareket yönü dolayısıyla çarpışma tehlikesi uyarısı olarak otomatik zil çalmaya yapılmaya devam ediyor.



Şekil 4.5. Hattaki aracın hızı  $V=7$  km/s. iken tehlikeli alanın içerisindeyken ekran görüntüsü, uyarı zili çalmaya devam ediyor.

- Hattaki Araç Tehlikeli Alan içerisinde ve hızı  $V=13$  km/s. iken ekran görüntüsü;

Önümüzdeki aracın kesin çarpışma ihtimali hesaplanıyor, otomatik fren devreye giriyor.



Şekil 4. 6. Önümüzdeki obje tehlikeli bölgenin içinde, tespit edilen hareket yönü çarpışma tehlikesi

#### 4.1.2.Test

–İnsanın araca doğru koşması( $V=8$  km./s) yönü henüz kesin çarpışma ihtimali olmadığından dolayı sadece zil uyarısı yapılıyor.

Önümüzdeki obje tehlikeli bölgenin içinde, tespit edilen hareket yönü çarpışma tehlikesi var.

İlerleme hızı ve yönü henüz kesin çarpışma ihtimali olmadığından dolayı sadece zil uyarısı yapılıyor.



Araca doğru koşan bir insan  
Toplam hız: 8 km/s

Şekil 4.7. İnsanın araca doğru koşması( $V=8$  km./s) yönü henüz kesin çarpışma ihtimali olmadığından dolayı sadece zil uyarısı yapılıyor.

**–İnsanın araca doğru koşması(V=11 km./s) yönü kesin çarpışma ihtimali olduğundan dolayı sadece zil uyarısı yapılıyor.**

Önümüzdeki obje tehlikeli bölgenin içinde, tespit edilen hareket yönü çarpışma tehlikesi var.

İlerleme hızı ve yönü henüz kesin çarpışma ihtimali olmadığından dolayı sadece zil uyarısı yapılıyor.



Araca doğru koşan bir  
insan

Toplam hız: 11 km/s

**Şekil 4.8.** İnsanın araca doğru koşması(V=11 km./s) yönü kesin çarpışma ihtimali olduğundan dolayı sadece zil uyarısı yapılıyor.

**–İnsanın araca doğru koşması(V=14 km./s) yönü kesin çarpışma ihtimali olduğundan dolayı zil uyarısının yanında otomatik frenleme de yapılıyor.**

Önümüzdeki obje tehlikeli bölgenin içinde, tespit edilen hareket yönü çarpışma tehlikesi içeriyor.

İlerleme hızı ve yönü göz önünde bulundurularak kesin çarpışma ihtimali hesaplanmıştır. Otomatik frenleme devreye girmiştir.



Araca doğru koşan bir insan  
Toplam hız: 14 km/s

**Şekil 4.9.** İnsanın araca doğru koşması(V=14 km./s) yönü kesin çarpışma ihtimali olduğundan dolayı zil uyarısının yanında otomatik frenleme de yapılıyor.



–İnsanın araca doğru koşması( $V=12$  km./s) yönü kesin çarpışma ihtimali olduğundan dolayı zil uyarısının yanında otomatik frenleme de yapılıyor.

Önümüzdeki obje tehlikeli bölgenin içinde, tespit edilen hareket yönü çarpışma tehlikesi içeriyor.

İlerleme hızı ve yönü göz önünde bulundurularak kesin çarpışma ihtimali hesaplanmıştır. Otomatik frenleme devreye girmiştir.



Araca doğru koşan bir insan  
Toplam hız: 12 km/s

**Şekil 4.10.** İnsanın araca doğru koşması( $V=12$  km./s) yönü kesin çarpışma ihtimali olduğundan dolayı zil uyarısının yanında otomatik frenleme de yapılıyor.

–İnsanın araca doğru koşması( $V=13$  km./s) fakat yönü değişmiştir. Kesin çarpışma ihtimali olduğundan dolayı zil uyarısının yanında otomatik frenleme de yapılıyor.

Obje tehlikeli bölgenin içinde, tespit edilen hareket yönü çarpışma tehlikesi içeriyor. Objeye yön değiştirmiştir fakat hala ilerleme hızı ve yönü göz önünde bulundurularak kesin çarpışma ihtimali hesaplanmıştır. Otomatik frenleme devreye girmiştir.



Araca doğru koşan bir insan  
Toplam hız: 13 km/s

**Şekil 4.11.** İnsanın araca doğru koşması( $V=13$  km./s) fakat yönü değişmiştir. Kesin çarpışma ihtimali olduğundan dolayı zil uyarısının yanında otomatik frenleme de yapılıyor.

-İnsanın araca doğru koşması( $V=13$  km./s) fakat yönü değişmiş ve Tehlikeli Alanın içerisine girmiştir. Kesin çarpışma ihtimali olduğundan dolayı zil uyarımı ve otomatik frenleme yapılıyor.

Obje tehlikeli bölgenin içinde, tespit edilen hareket yönü çarpışma tehlikesi içeriyor. Obje yön değiştirmiştir fakat hala ilerleme hızı ve yönü göz önünde bulundurularak kesin çarpışma ihtimali hesaplanmıştır. Otomatik frenleme devreye girmiştir.



Araca doğru koşan bir  
insan  
Toplam hız: 15 km/s

Şekil 4. 12. İnsanın araca doğru koşması( $V=15$  km./s. Kesin çarpışma ihtimali olduğundan dolayı zil uyarısının yanında otomatik frenleme de yapılıyor.

**-Çarpışma tehlikesi yoktur. Frenleme kaldırılmıştır.**

Çarpışma tehlikesi yoktur. Frenleme kaldırılmıştır(Şekil 4.13).



**Şekil 4.13.** Çarpışma tehlikesi yoktur. Frenleme kaldırılmıştır.

## KAYNAKLAR

- [1] J.Wilson, J.F.B. Hawkes (1983), Optoelektronik (İ.Okur Çev.), Adapazarı: Değişim Yayınları (2000)(s.174-334).
- [2] YALTIRIK M., Dişhekimliğinde Lazer Kullanımı, İ.Ü.Diş Hekimliği Fak. Ders Notları, <http://www.istanbul.edu.tr/dishekimligi/dersnotlari/lazer.pdf> (Erişim Tarihi: 20.03.2013)
- [3] I.Puente, H. González-Jorge, P. Arias and J. Armesto, Land-Based Mobile Laser Scanning Systems: A Review, Commission V, WG V/3, 2011.
- [4] A.Wehr, U.Lohr, Airborne laser scanning—anintroduction and overview, ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing 54 1999. 68–82.
- [5] B.Kasap, 3d-Nesne Modellemeye Yönelik Lazerli Bir Tarayıcı Sistemin Tasarımı ve Gerçekletirilmesi, Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Bilgisayar Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans Tezi, Kayseri, 2006.
- [6] G.BERBERCUMA, Üç Boyutlu Tarayıcılar İle Veri Toplanması ve Cad Ortamına Değişik Formatlarda Aktarılması, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, GEBZE, 2006.
- [7] K.Gümüş, H. Erkaya, Mühendislik Uygulamalarında Kullanılan Yersel Lazer Tarayıcı Sistemler, YTÜ Jeodezi ve Fotogrametri Müh.Bölümü, Ölçme Tekniği Anabilim Dalı, İstanbul.
- [8] D.L.Anderson, Underground Test Results of a Laser-Based Tram Control System for a Continuous Miner, United States Department of Interior Bureau of Mines Report of Investigations, 1992.
- [9] D. Van Nieuwenhove, W. Van der Tempel, R. Grootjans and M. Kuijk, Time-of-flight Optical Ranging Sensor Based on a Current Assisted Photonic Demodulator, Proceedings Symposium IEEE/LEOS Benelux Chapter, 2006, Eindhoven.

- [10] M.Özcan, A.O.Özkan, M.Yağcı, Lazer Cihazlarının İnsan Sağlığı Açısından Değerlendirilmesi ve Zararlı Etkilerinin Giderilmesi, Journal of Technical-Online Volume 4, Number:3-2005.
- [11] Berat Barış BULDUM, Mustafa Kemal KÜLEKÇİ, Mersin Üniv. [http://www.mmo.org.tr/resimler/dosya\\_ekler/bcfb42231cfd3c4\\_ek.pdf?dergi=1069](http://www.mmo.org.tr/resimler/dosya_ekler/bcfb42231cfd3c4_ek.pdf?dergi=1069), Makine Müh.Odası Dergisi Cilt:51, Sayı 610, 2010.
- [12] Özden, H. 2003. "Gemi İnşaatında Kaim Çelik Sac Kaynak Bağlantılarının İşletme Mukavemeti" Kaynak Teknolojisi IV. Ulusal Kongresi Bildiriler Kitabı, TMMOB Makina Mühendisleri Odası Yayım, (s. 30-39).
- [13] Gök Bilim Rehberi - 9a (Gökyüzü Gözleminin Temel Kavramları), <http://bidiskop-buyutec.blogspot.com.tr/2013/06/gok-bilim-rehberi-9a-gokyuzu-gozleminin.html>, (Erişim Tarihi: 12.06.2014)
- [14] S.Poyraz, Lazerler ve Kullanım Alanları, <http://mialonde.wordpress.com/2009/06/11/lazerler-ve-kullanim-alanlari/> (Erişim Tarihi:14.06.2014)
- [15] Excimer Lazer Nedir, <http://www.sakaryahastanesigozklinigi.com/hekimlerimiz/excimer-lazer-nedir/>, Sakarya Hastanesi Göz Kliniği, (Erişim Tarihi:15.06.2014)
- [16] ANSI, Z 136.1, American National Standards Institute, American National Standard for the Safe Use of Lasers,(NY,10036), New York, 2000.
- [17] T.Pekiner, Lazerin Endüstriyel Uygulamalarında İş Sağlığı ve Güvenliği, 27.İş Sağlığı ve Güvenliği Haftası Sunumu, 2013.
- [18] G.Fasol, Room-Temperature Blue Gallium Nitride Laser Diode, Science, Vol 272, s.1724-1749, 21.06.1996.
- [19] Amann, M-Ch., Bosch, T., Lescure, M., Myllylä, R. and Riox, M., 2001. Laser ranging: a critical review of usual techniques for distance measurement. Optical Engineering, 40 (1), pp. 10 – 19.

- [20] Ingensand, H., Methodological aspects in terrestrial laser-scanning technology., 12th FIG Symposium on Deformation Measurements, 2006.
- [21] E. Musayev Optoelektronik Devreler ve Sistemler, Birsen Yayınevi, İstanbul 1999.
- [22] R.Lange, 3D Time-of-Flight Distance Measurement with Custom Solid-State Image Sensors in CMOS/CCD-Technology, Siegen Univ. Doktora Tezi, 2000.
- [23] Boehler, W. and Marbs, A., 2002. 3D Scanning Instruments. In Proceedings of International Workshop on Scanning for Cultural Heritage Recording – Complementing or Replacing Photogrammetry. Corfu, Greece, September, 1–2.
- [24] J.Singh, Optoelectornics- An Introduction To Materials And Devices, McGraw –Hill International Editions, (1996), (s. 356-359).
- [25] LD-MRS(Laser Measurement Sensor) Kullanım Kılavuzu model LD-MRS400001.