

**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**FİZİK**  
**ANABİLİM DALI**

**DOKTORA TEZİ**

**PLATFORMDAN BAĞIMSIZ WEB TABANLI**  
**GERÇEK ZAMANLI LİDAR HARİTALAMA**

**LEVENT CANDAN**

**KOCAELİ 2023**

**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**FİZİK**  
**ANABİLİM DALI**

**DOKTORA TEZİ**

**PLATFORMDAN BAĞIMSIZ WEB TABANLI**  
**GERÇEK ZAMANLI LİDAR HARİTALAMA**

**LEVENT CANDAN**

**Prof. Dr. Elif KAÇAR**  
**Danışman, Kocaeli Üniversitesi**

.....

**Prof. Dr. Arzu ERENER**  
**Jüri Üyesi, Kocaeli Üniversitesi**

.....

**Doç. Dr. Oktay CEBECİOĞLU**  
**Jüri Üyesi, Kocaeli Üniversitesi**

.....

**Prof. Dr. Emine CAN**  
**Jüri Üyesi, İstanbul Medeniyet Üniversitesi**

.....

**Prof. Dr. Gülcan SARP**  
**Jüri Üyesi, Süleyman Demirel Üniversitesi**

.....

**Tezin Savunulduğu Tarih: 15.06.2023**

## ETİK BEYAN VE ARAŞTIRMA FONU DESTEĞİ

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

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

beyan ederim.

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

☒ Bu proje çalışması kapsamında üretilen veri ve bilgiler Kocaeli Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından FDK-2021-2561 no'lu proje kapsamında maddi/alt yapı desteği alınarak gerçekleştirilmiştir.

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

(İmza)

Levent CANDAN

## YAYIMLAMA VE FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI

Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından onaylanan lisansüstü tezimin/projemin tamamını veya herhangi bir kısmını, basılı ve elektronik formatta arşivleme ve aşağıda belirtilen koşullarla kullanıma açma izninin Kocaeli Üniversitesi'ne verdiğimi beyan ederim. Bu izinle Üniversiteye verilen kullanım hakları dışındaki tüm fikri mülkiyet haklarım bende kalacak, tezimin/projemin tamamının ya da bir bölümünün gelecekteki çalışmalarda (makale, kitap, lisans ve patent vb.) kullanımı bana ait olacaktır.

Tezin/projenin kendi özgün çalışmam olduğunu, başkalarının haklarını ihlal etmediğimi ve tezimin/projenin tek yetkili sahibi olduğumu beyan ve taahhüt ederim. Tezimde yer alan telif hakkı bulunan ve sahiplerinden yazılı izin alınarak kullanılması zorunlu metinlerin yazılı izin alarak kullandığımı ve istenildiğinde suretlerini Üniversiteye teslim etmeyi taahhüt ederim.

Yükseköğretim kurulu tarafından yayınlanan **“Lisansüstü Tezlerin Elektronik Ortamda Toplanması, Düzenlenmesi ve Erişime Açılmasına İlişkin Yönerge”** kapsamında tezim aşağıda belirtilen koşullar haricinde YÖK Ulusal Tez Merkezi/ Kocaeli Üniversitesi Kütüphaneleri Açık Erişim Sisteminde erişime açılır.

- ☐ Enstitü yönetim kurulu kararı ile tezimin erişime açılması mezuniyet tarihinden itibaren 2 yıl ertelenmiştir.
- ☐ Enstitü yönetim kurulu gerekçeli kararı ile tezimin erişime açılması mezuniyet tarihinden itibaren 6 ay ertelenmiştir.
- ☒ Tezim ile ilgili gizlilik kararı verilmemiştir.

(İmza)

Levent CANDAN

## ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Hem yüksek lisans hem de doktora tez çalışmalarım boyunca bilgi ve tecrübesiyle bana her daim yol gösteren ve bilimsel bakış açısı kazandıran değerli danışman hocam Prof. Dr. Elif KAÇAR'a en içten dileklerle teşekkür ederim.

Doktora tez çalışmalarım süresince desteklerini esirgemeyen ve bakış açımı genişleterek çalışmalarına büyük katkılar sağlayan sayın hocalarım Prof. Dr. Arzu ERENER ve Doç. Dr. Oktay CEBECİOĞLU'na şükranlarımı sunarım.

Doktora çalışmalarına başlamadan önce birlikte hâyâl kurduğumuz ve teknik konularda beni cesaretlendiren değerli arkadaşım Ersin ARSLAN'a teşekkür ederim. Çalışmalarım süresince desteklerini esirgemeyen ve özellikle uçuş platformu olarak dronun temini ve koordinesi konusunda yardımcı olan dostlarım Doç. Dr. Belgin GENÇ ÖZTOPRAK ve Doç. Dr. Erhan AKMAN'a teşekkür ederim. Çalışmalarımın laboratuvar ortam deneylerini ve sistem geliştirmelerini gerçekleştirdiğim Lazer Teknolojileri Araştırma ve Uygulama Merkezinin yöneticisi Prof. Dr. Ersin KAYAHAN'a desteğinden dolayı teşekkür ederim. Dron ile yaptığım deneysel çalışmalarda bana eşlik eden ve dronun pilotluğunu yapan İsmail ÇALIK ve TEKNOFEST yarışma ekibi arkadaşlarından Bayram Emin SABANCI'ya teşekkür ederim.

Bu çalışma Kocaeli Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından FDK-2021-2561 kodlu Doktora projesi ile desteklenmiştir. Bu destekten dolayı teşekkür ederim.

Doktora çalışmalarım süresince bana olan güvenlerinden ve gösterdikleri sabırdan dolayı, başta annem Ağca CANDAN'a, beni çocuklarından ayırmayarak her zaman destek olan Ali Osman KÜÇÜK ve Zilfinaz KÜÇÜK'e şükranlarımı sunarım. Kendimi bildim bileli okumamı öğütleyen rahmetli babam Raif CANDAN'ı saygıyla anıyorum ve şükranlarımı sunuyorum.

Çalışmalarım süresince destek ve motivasyonunu hiçbir zaman esirgemeyen sevgili eşim Emel CANDAN'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Bu çalışmayı, zaman zaman çalışmalarına ortak olan sevgili çocuklarım Doğa ve Görkem'e ithaf ediyorum.

Haziran – 2023

Levent CANDAN

## İÇİNDEKİLER

|                                                                                      |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| ETİK BEYAN VE ARAŞTIRMA FONU DESTEĞİ.....                                            | i   |
| YAYIMLAMA VE FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI .....                                            | ii  |
| ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR.....                                                               | iii |
| İÇİNDEKİLER.....                                                                     | iv  |
| ŞEKİLLER DİZİNİ .....                                                                | vi  |
| TABLOLAR DİZİNİ.....                                                                 | ix  |
| SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ .....                                                 | x   |
| ÖZET .....                                                                           | xi  |
| ABSTRACT .....                                                                       | xii |
| 1. GİRİŞ .....                                                                       | 1   |
| 2. UZAKTAN ALGILAMA VE LİDAR HARİTALAMA.....                                         | 4   |
| 2.1. Uzaktan Algılama Teknolojileri .....                                            | 4   |
| 2.2. Uzaktan Algılama ve LiDAR .....                                                 | 7   |
| 2.3. LiDAR ve Temel Bileşenleri .....                                                | 9   |
| 2.3.1. Lazerler ve Özellikleri.....                                                  | 12  |
| 2.3.2. Lazerle Mesafe Ölçme .....                                                    | 12  |
| 2.3.2.1. Lazer Atım Temelli Ölçüm .....                                              | 13  |
| 2.3.2.2. Lazer Faz Temelli Ölçüm.....                                                | 15  |
| 2.3.3. Lazer Mesafe Ölçerin Yapısı.....                                              | 16  |
| 2.3.4. Lazerle Tarama.....                                                           | 18  |
| 2.3.5. LiDAR Verilerinin İşlenmesi ve Kullanımı .....                                | 20  |
| 2.4. LiDAR ve Web Teknolojileri .....                                                | 22  |
| 2.5. Web 3D (X3D) .....                                                              | 22  |
| 3. YÖNTEM: LİDAR VE HARİTALAMA .....                                                 | 26  |
| 3.1. Lazer Tarayıcı ve Kayıt Ortamı .....                                            | 28  |
| 3.2. Web Görselleştirme (X3D).....                                                   | 30  |
| 3.2.1. X3D Dosya Formatı .....                                                       | 31  |
| 3.2.2. X3D Dosya Formatı Kullanımı .....                                             | 33  |
| 3.2.3. Geliştirilen Tasarımda X3D Dosya Formatının Kullanımı .....                   | 35  |
| 3.3. Tasarlanan Sistemde Kullanılan Yazılım ve Bileşenler .....                      | 36  |
| 3.3.1. C/C++ .....                                                                   | 36  |
| 3.3.2. Python .....                                                                  | 36  |
| 3.3.3. PHP, MySQL ve jQuery.....                                                     | 37  |
| 3.3.4. Navio2 Uçuş Kontrol Kartı .....                                               | 38  |
| 3.3.5. Pixhawk Uçuş Kontrol Kartı .....                                              | 40  |
| 4. SİMÜLASYON PLATFORMUNDA LİDAR HARİTALAMA .....                                    | 42  |
| 4.1. Deneysel Sistem.....                                                            | 42  |
| 4.2. Simülasyon Platformu için LiDAR Veri İşleme ve Gerçek Zamanlı Haritalama.....   | 44  |
| 4.3. Değerlendirme .....                                                             | 51  |
| 5. ELLE TAŞINABİLİR PLATFORMDA LİDAR HARİTALAMA.....                                 | 52  |
| 5.1. Deneysel Sistem.....                                                            | 52  |
| 5.2. Elle Taşınabilir Platformda LiDAR Veri İşleme ve Gerçek Zamanlı Haritalama..... | 55  |
| 5.3. Değerlendirme .....                                                             | 65  |
| 6. İHA PLATFORMUNDA LİDAR HARİTALAMA.....                                            | 66  |

|                                                                            |    |
|----------------------------------------------------------------------------|----|
| 6.1. Deneysel Sistem.....                                                  | 66 |
| 6.2. İHA Platformunda LiDAR Veri İşleme ve Gerçek Zamanlı Haritalama ..... | 68 |
| 6.3. Değerlendirme .....                                                   | 74 |
| 7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....                                               | 75 |
| KAYNAKLAR.....                                                             | 79 |
| KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER.....                                              | 85 |
| ÖZGEÇMİŞ.....                                                              | 86 |



## ŞEKİLLER DİZİNİ

|             |                                                                                                                                                                                                                                     |    |
|-------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 2.1.  | EM dalga kullanılan uzaktan algılama süreci .....                                                                                                                                                                                   | 6  |
| Şekil 2.2.  | Uzaktan algılama veri toplama sistemlerinin bant aralıkları ve elektromanyetik spektrumundaki yerleri .....                                                                                                                         | 7  |
| Şekil 2.3.  | Şematik LiDAR sistemi (hava ve yer kısımları).....                                                                                                                                                                                  | 11 |
| Şekil 2.4.  | a) Işık kaynağı kullanarak mesafe ölçümü yöntemi. b) Lazer mesafe ölçer kullanarak mesafe ölçümü (TOF yöntemi).....                                                                                                                 | 14 |
| Şekil 2.5.  | a) Bir CW (Sürekli) lazerden yayılan ve cisimden yansıyan sinyaller arasında faz karşılaştırması ve b) iki sinyal arasındaki faz karşılaştırması .....                                                                              | 16 |
| Şekil 2.6.  | Lazer mesafe ölçerin ana bileşenlerinin şematik görünümü.....                                                                                                                                                                       | 17 |
| Şekil 2.7.  | Hareket doğrultusuna dik yönde kontrol edilebilir açıyla tarama yapabilen hava platformu üzerine yerleştirilen lazer profil oluşturucunun şematik gösterimi .....                                                                   | 18 |
| Şekil 2.8.  | a) Tipik bir hava LiDAR sistemi ve b) çeşitli lazer tarama mekanizmaları ile ortaya çıkan zemin modellerinin şematik gösterimi .....                                                                                                | 19 |
| Şekil 2.9.  | a) LiDAR nokta bulutu ve b) LiDAR yüzey üretimi .....                                                                                                                                                                               | 21 |
| Şekil 2.10. | İnterpolasyon yöntemleri: a) doğrusal interpolasyon, b) ters ağırlıklı mesafe interpolasyon ve c) üçgensel interpolasyon .....                                                                                                      | 21 |
| Şekil 3.1.  | Platformdan Bağımsız Web Tabanlı Gerçek Zamanlı LiDAR Haritalama Sisteminin şematik gösterimi. Uzaktan Algılama Platformu (İnsansız Hava Aracı) ve Yer Kontrol ve Kayıt İstasyonu .....                                             | 27 |
| Şekil 3.2.  | Geliştirilen sistemin temel yapısı: Uzaktan Algılama Platformundan alınan verilerin Yer Kontrol ve Kayıt İstasyonu aktarma ve görselleştirme süreçleri .....                                                                        | 28 |
| Şekil 3.3.  | a) SF45B model lazer tarayıcı ve b) Raspberry Pi 4B .....                                                                                                                                                                           | 30 |
| Şekil 3.4.  | X3D dosya yapısının HTML etiketleri arasındaki görünümü .....                                                                                                                                                                       | 34 |
| Şekil 3.5.  | X3D dosya yapısının web tarayıcısında görünümü .....                                                                                                                                                                                | 34 |
| Şekil 3.6.  | HMTL5 ve X3D etiketlerinin sayfa kaynak kodunda görünümü: a) <Poinset> etiketinin kullanımı, b) <Coordinate> etiketinin kullanımı, c) $(x_n, y_n)$ koordinatlarının ve $(z_n)$ değerlerinin veri tabanından çekilmiş görünümü ..... | 35 |
| Şekil 3.7.  | PHP, MySQL ve phpMyAdmin sürüm bilgileri .....                                                                                                                                                                                      | 37 |
| Şekil 3.8.  | jQuery'nin AJAX özelliği ile verilerin alınmasını gösteren betik .....                                                                                                                                                              | 38 |
| Şekil 3.9.  | Navio2 uçuş kontrol kartı ve Raspberry Pi 4B entegrasyonu .....                                                                                                                                                                     | 39 |
| Şekil 3.10. | Pixhawk Cube Orange+Here3+ otopilot uçuş kontrol kartı .....                                                                                                                                                                        | 41 |
| Şekil 4.1.  | Simülasyon sistemi: Uzaktan algılama platformu, tarama sistemi, LMÖ, kayıt sistemi ve IMU .....                                                                                                                                     | 42 |
| Şekil 4.2.  | Laboratuvar ortamında simülasyon deneysel çalışma alanına genel bakış .....                                                                                                                                                         | 43 |
| Şekil 4.3.  | Kartezyen koordinatlarda veri elde etme ve görselleştirme algoritması .....                                                                                                                                                         | 45 |
| Şekil 4.4.  | Yaklaşık 1 dakika sürede alınmış LiDAR verilerinin MySQL veri tabanında verilerin görünümü. Ölçülen nokta sayısı 114.438 adettir .....                                                                                              | 46 |

|             |                                                                                                                                                                      |    |
|-------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 4.5.  | 3B Nokta Bulutu görselleştirme web arayüzü .....                                                                                                                     | 46 |
| Şekil 4.6.  | X3D sahnesinde nesnelerin 3B nokta bulutları.....                                                                                                                    | 47 |
| Şekil 4.7.  | X3D sahnesindeki nesnelerle örtüşen 3D nokta bulutu .....                                                                                                            | 48 |
| Şekil 4.8.  | Farklı zaman dilimlerinde taranan yüzeyde gerçek nesnelerin X3D sahnesinde görünümü .....                                                                            | 49 |
| Şekil 4.9.  | Nesnelerin lazer tarama ile ölçülen yüksekliği ve nesnelerin gerçek yüksekliği arasındaki doğruluk karşılaştırması .....                                             | 49 |
| Şekil 4.10. | Her üç ekseninde ivme değişiklikleri.....                                                                                                                            | 50 |
| Şekil 4.11. | Her üç ekseninde yunuslama (pitch), yuvarlanma/yalpa (roll) ve sapma/dönme (yaw) değişiklikleri.....                                                                 | 50 |
| Şekil 5.1.  | Elle taşınabilir platform bağımsız LiDAR sistemi .....                                                                                                               | 52 |
| Şekil 5.2.  | Elle taşınabilir platform bağımsız LiDAR sistemi için deneysel çalışma alanına genel bakış ( $\sim 8 \times 5 \text{m}^2$ ) .....                                    | 53 |
| Şekil 5.3.  | Küresel koordinatlara göre platform bağımsız LiDAR sisteminin hareketi.....                                                                                          | 54 |
| Şekil 5.4.  | Navio2/Pixhawk Cube uçuş kontrol kartları ile veri elde etme ve görselleştirme algoritması.....                                                                      | 56 |
| Şekil 5.5.  | Yaklaşık 5 dakika sürede alınmış 6727 adet LiDAR verisinin MySQL veri tabanında verilerin görünümü.....                                                              | 57 |
| Şekil 5.6.  | Kullanıcı girişi (a) ve kayıt olma (b) web arayüzü .....                                                                                                             | 57 |
| Şekil 5.7.  | Uzak-yerel 3B Nokta Bulut Haritası Görüntüleme Arayüzü.....                                                                                                          | 58 |
| Şekil 5.8.  | Zamana göre veri akış grafikleri.....                                                                                                                                | 58 |
| Şekil 5.9.  | MySQL veri tabanına kayıt edilmiş veriler ile 3B nokta bulutu harita görüntüleme web arayüzü.....                                                                    | 59 |
| Şekil 5.10. | Platformun zamana göre anlık yunuslama (pitch), yuvarlanma/yalpa (roll) ve sapma/dönme (yaw) verileri.....                                                           | 59 |
| Şekil 5.11. | Platformun zamana göre anlık yunuslama (pitch), yuvarlanma/yalpa (roll) ve sapma/dönme (yaw) verilerinde seçilen bölgenin ayrıntılı görünümü .....                   | 60 |
| Şekil 5.12. | Lazer tarayıcının görüş alanının (FOV: Field of View) yaklaşık $60^\circ$ de çalışırken a) tüm deney süresince ve b) seçilen bölgenin daha ayrıntılı gösterimi ..... | 61 |
| Şekil 5.13. | XY düzleminde konum bilgisinin a) deney süresince grafiğinin gösterimi ve b) seçilen bölgenin daha ayrıntılı gösterimi.....                                          | 61 |
| Şekil 5.14. | Deney süresince X3D dosya formatına uygun a) x-ekseni boyunca ilerleme ve tarama grafiğinin gösterimi, b) seçilen bölgenin daha ayrıntılı gösterimi.....             | 62 |
| Şekil 5.15. | Deney süresince X3D dosya formatına uygun a) yüzeyin yükseklik bilgisinin izlendiği grafiğin ve b) seçilen bölgenin daha ayrıntılı gösterimi.....                    | 62 |
| Şekil 5.16. | Deney süresince X3D dosya formatına uygun a) z-ekseni boyunca ilerleme ve tarama grafiğinin gösterimi, b) seçilen bölgenin daha ayrıntılı gösterimi.....             | 63 |
| Şekil 5.17. | Farklı zaman dilimlerinde taranan yüzey ve nesnelerin X3D sahnesinde görünümü .....                                                                                  | 64 |
| Şekil 6.1.  | Alçak irtifa İHA platformu ile platformdan bağımsız LiDAR sisteminin birlikte görünümü .....                                                                         | 67 |

|             |                                                                                                                                                                                    |    |
|-------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 6.2.  | Alçak irtifada uçabilen dron tarafından taşınabilen taşınabilir platform bağımsız LiDAR sistemi için deneysel çalışma alanına genel bakış ( $\sim 24 \times 24 \text{m}^2$ ) ..... | 67 |
| Şekil 6.3.  | Yaklaşık 10 dakikalık uçuş süresince alınmış 12.149 LiDAR verisinin MySQL veri tabanında verilerin görünümü.....                                                                   | 69 |
| Şekil 6.4.  | Zamana göre veri akış grafikleri .....                                                                                                                                             | 69 |
| Şekil 6.5.  | 3B nokta bulutunun elde edilmesi. Sol üst köşede görüntünün negatif görünümü, sağ üst köşede taraması yapılan bölgenin fotoğrafı görünmektedir .....                               | 70 |
| Şekil 6.6.  | Farklı zaman dilimlerinde taranan yüzeyin X3D sahnesinde görünümü .....                                                                                                            | 71 |
| Şekil 6.7.  | Yaklaşık 3 dakikalık uçuş süresince alınmış 3989 LiDAR verisinin MySQL veri tabanında verilerin görünümü.....                                                                      | 72 |
| Şekil 6.8.  | Yaklaşık 3 dakikalık deneysel çalışmanın zamana göre veri akış grafikleri.....                                                                                                     | 73 |
| Şekil 6.9.  | 3B nokta bulutunun elde edilmesi. Sol üst köşede görüntünün negatif görünümü, sağ üst köşede taraması yapılan bölgenin fotoğrafı görünmektedir .....                               | 73 |
| Şekil 6.10. | X3D sahnesinde araçların gerçek boyutuyla karşılaştırma.....                                                                                                                       | 74 |

## TABLÖLAR DİZİNİ

|            |                                                                                            |    |
|------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tablo 3.1. | SF45B lazer tarayıcısının özellikleri .....                                                | 29 |
| Tablo 3.2. | Navio2 uçuş kontrol kartının özellikleri .....                                             | 39 |
| Tablo 3.3. | Pixhawk Cube Orange+Here3 <sup>+</sup> otopilot uçuş kontrol kartının<br>özellikleri ..... | 40 |
| Tablo 4.1. | Şekil 4.2’de etiketlenmiş hedef nesne bilgileri .....                                      | 44 |
| Tablo 4.2. | Simülasyon sisteminin X3D sahnesi eksenlerine uygun<br>denklemleri .....                   | 44 |
| Tablo 5.1. | Şekil 5.2’de etiketlenmiş hedef nesne bilgileri .....                                      | 53 |
| Tablo 5.2. | Platform bağımsız sistemin X3D sahnesi eksenlerine uygun<br>denklemleri .....              | 55 |



## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

|            |                  |
|------------|------------------|
| as         | : Attosaniye     |
| $c$        | : Işık hızı      |
| cm         | : Santimetre     |
| km         | : Kilometre      |
| m          | : Metre          |
| mA         | : Miliamper      |
| mm         | : Milimetre      |
| ms         | : Milisaniye     |
| mW         | : Miliwatt       |
| MW         | : Megawatt       |
| $n$        | : Kırılma indisi |
| nm         | : Nanometre      |
| s          | : Saniye         |
| $t$        | : Zaman          |
| W          | : Watt           |
| $\Delta t$ | : Zaman farkı    |
| $\lambda$  | : Dalga boyu     |
| V          | : Volt           |

### Kısaltmalar

|       |                                                                                    |
|-------|------------------------------------------------------------------------------------|
| AI    | : Artificial Intelligence (Yapay Zekâ)                                             |
| CBS   | : Coğrafi Bilgi Sistemleri                                                         |
| DOM   | : Document Object Model (Belge Nesnesi Modeli)                                     |
| EM    | : Elektromanyetik                                                                  |
| GNSS  | : Global Navigation Satellite Systems (Küresel Konumlandırma Uydu Sistemleri)      |
| HSI   | : Hyperspectral Imaging (Hiperspektral Görüntüleme)                                |
| IMU   | : Inertial Measurement Unit (Eylemsizlik Ölçüm Birimi)                             |
| İHA   | : İnsansız Hava Aracı                                                              |
| KYS   | : Konum ve Yönlendirme Sistemi                                                     |
| Laser | : Laser Amplification by the Stimulated Emission of Radiation                      |
| Lazer | : Uyarılmış Yayılma ile Işığın Güçlendirilmesi                                     |
| LiDAR | : Laser Imaging Detection and Ranging (Lazerle Görüntü Algılama ve Uzaklık Ölçümü) |
| LMÖ   | : Lazer Mesafe Ölçer                                                               |
| ML    | : Machine Learning (Makine Öğrenmesi)                                              |
| NIR   | : Near-infrared (Yakın Kızılötesi)                                                 |
| SYM   | : Sayısal Yükseklik Modeli                                                         |
| SYÜM  | : Sayısal Yüzey Modeli                                                             |
| TOF   | : Time of Flight (Uçuş süresi)                                                     |
| X3D   | : eXtensible 3D (Genişletilebilir 3B)                                              |
| X3DOM | : X3D+DOM                                                                          |
| XML   | : Extensible Markup Language (Genişletilebilir İşaretleme Dili)                    |
| VRML  | : Virtual Reality Modeling Language (Sanal Gerçeklik Modelleme Dili)               |

# PLATFORMDAN BAĞIMSIZ WEB TABANLI GERÇEK ZAMANLI LiDAR HARİTALAMA

## ÖZET

LiDAR teknolojisi günümüzde birçok alanda önemli bir rol oynamaktadır. LiDAR verilerinin doğru ve zamanında elde edilebilirliği/kullanılabilirliği, çevresel değişikliklerin izlenmesi ve afet sonrası acil durum müdahalesi gibi durumlarda hızlı ve güvenilir 3 Boyutlu (3B) hasar değerlendirmesi açısından çok önemlidir. Ancak, hayati nitelik taşıyan bu tür değerlendirmelerde bazı zorluklarla karşılaşılabilir. LiDAR verilerinin anlık olarak görselleştirilememesi veya tarama yapılan bölgede çeşitli koşullardan dolayı veri alınamaması veya eksik veri alınması gibi durumlar söz konusu olabilir. Bu tez çalışmasında bu sorunları gidermek ve afet durumlarında kullanılabilecek gerçek-zamanlı 3B nokta bulutu üretmek için alçak irtifalı LiDAR (İHA-LiDAR) sistemlerine dayanan bir yöntem geliştirilmiştir. Bu yöntem, uçuş öncesi ve uçuş sonrası süreçlerde ortaya çıkan sorunları ortadan kaldırır ve web tabanlı bir platform aracılığıyla gerçek zamanlı 3B nokta bulutlarının oluşturulmasını sağlar. Geliştirilen bu yöntem kullanılarak, veri alma ve işleme süreçlerini kısaltan Platformdan Bağımsız Web Tabanlı Gerçek Zamanlı LiDAR Haritalama Sistemi yapılmıştır. Bu sistem hem laboratuvarında hem de gerçek ortamda farklı platformlara uyumlu deneysel sistemler üzerinde test edilmiştir. Bu sistem, gerçek zamanlı verileri elde etme, kaydetme ve paylaşma özelliklerine sahiptir. Bu çalışmanın bir diğer amacı da, üretilen LiDAR verilerinin uzmanlar ve farklı alanlardaki araştırmacılarca kolay erişilebilir olmasını sağlamaktır. Bu bağlamda, kullanıcı dostu bir 3B nokta bulut haritası görüntüleme web arayüzü geliştirilmiştir. Geliştirilen sistem, elde edilen verilerin 3B görselleştirmesini web tabanlı olarak gerçekleştirmekte ve X3D dosya formatını kullanmaktadır. X3D dosya formatı, büyük veri içeren sistemlerde kentsel nesnelerin tanımlanmasında yapay zekâ ve makine öğrenimi tabanlı sistemler için altyapı sağlamaktadır.

**Anahtar Kelimeler:** 3B Nokta Bulutu, Gerçek Zamanlı LiDAR, Uzaktan Algılama, X3D, Web Temelli İHA-LiDAR.

# **PLATFORM-INDEPENDENT WEB-BASED REAL-TIME LIDAR MAPPING**

## **ABSTRACT**

LiDAR technology plays an important role in many fields today. Accurate and timely availability of LiDAR data is crucial for rapid and reliable 3D damage assessment in situations such as monitoring environmental changes and post-disaster emergency response. However, there may be difficulties in this evaluation process. There may be situations such as the inability to view the LiDAR data instantly or the inability to obtain the data due to various conditions in the scanning area or the incomplete data to be obtained. A method based on low-altitude LiDAR (UAV-LiDAR) systems has been developed to address these problems and generate real-time 3D point clouds that can be used in disaster. This method eliminates the problems that arise in pre-flight and post-flight processes and enables the creation of real-time 3D point clouds via a web-based platform. By using this developed method, Platform Independent Web Based Real Time LiDAR Mapping System which shortens the data acquisition and processing processes, has been implemented. This system has been tested on experimental systems compatible with different platforms, both in the laboratory and in real environments. The system has real-time data acquisition, recording, and sharing features. Another purpose of this study is to ensure that the produced LiDAR data is easily accessible by experts and researchers in different fields. For this purpose, a user-friendly 3D point cloud map visualization web interface has been developed. The developed system performs web-based 3D visualization of the obtained data and uses the X3D file format. The X3D file format provides infrastructure for artificial intelligence and machine learning-based systems for identifying urban objects in systems with large amounts of data.

**Keywords:** 3D Point Cloud, Real Time LiDAR, Remote Sensing, X3D, Web Based UAV-LiDAR.

## 1. GİRİŞ

Hızla değişen dünyada, LiDAR verileri doğal ortam ve çevre değişimi, orman yönetimi, ulaşım ve kentsel gelişimin takibi gibi süreçlerde kullanılabilecek önemli bir kaynaktır. LiDAR tekniğinin haritalamadaki temel avantajı; tam doğrulukla coğrafi olarak belirlenmiş yoğun nokta bulutları kümesini doğrudan toplayan oldukça hassas bir yöntem olmasıdır. LiDAR verilerinin doğru ve zamanında elde edilebilir olması bazı durumlarda hayati önem taşımaktadır. Ancak yüksek irtifalı platformlar için sis, bulut ve afet dönemlerinde platformun uçuş parametreleri (hava alanı, pist, hazırlık zamanı vs.) gibi etkenler doğru veri elde etmeye engel olabilir. Ortam koşullarının negatif etkilerini ortadan kaldırmak ve kullanım kolaylığını artırmak için taşıyıcı sistemin irtifası azaltılmaktadır. Bu bağlamda her türlü çevresel değişimin takibi için hızlıca harita oluşturma amacıyla, alçak irtifalı İHA ile taşınan LiDAR sistemlerinin tasarımı gerçekleştirilebilir.

Bu tez çalışmasında, özel durumda İHA-LiDAR, genel durumda ise Platformdan Bağımsız Web Tabanlı Gerçek Zamanlı LiDAR Haritalama Sistemi tasarlanmış ve gerçekleştirilmiştir. Temel motivasyonumuz, alçak irtifalı İHA-LiDAR'ın uzun süreli uçuş planlama, otopilot sistemleri, düzenli yörünge belirleme gibi uçuş öncesi ve veri işleme gibi uçuş sonrası süreçlerinden kaynaklanan problemlerin çözümüne katkı sağlamaktır.

Geliştirdiğimiz Platformdan Bağımsız Web Tabanlı Gerçek Zamanlı LiDAR Haritalama Sistemi, LiDAR verilerini anlık olarak web tabanlı 3B görselleştirilmesini sağlamaktadır. Bunun yanı sıra yenilenebilen/iyileştirilebilen bir yapıya sahip olan sistem veri işleme süreçlerini kısaltmakta ve uçuş öncesinde planlama gerektirmeksizin afet durumları gibi hızlı karar almayı gerektiren durumlarda etkin kullanılabilme potansiyeli barındırmaktadır. Ayrıca geliştirilen bu sistemin anlık 3B nokta bulutu haritalama sağlayan verilerinin PostGIS/PostgreSQL veya MySQL gibi bir veri tabanında yapay zekâ (AI) ve makine öğrenimi (ML) temelli sistemlerde kullanılabilir şekilde saklanabiliyor olması da yine afet durumlarında kullanılabilecek bir bilgi ve öngörü sağlar niteliktedir. Bu tez çalışması kapsamında tasarladığımız ve geliştirdiğimiz Platformdan Bağımsız Web Tabanlı Gerçek Zamanlı LiDAR Haritalama Sisteminin tüm geliştirme aşamaları bu tezin her bir bölümünü oluşturmaktadır. Bu çalışmayı

özgünleştiren ve geliştirmeye değer kılan, LiDAR sisteminden elde edilen verilerin gerçek zamanlı işlenmesi için Web3D standardı olan X3D (Extensible 3D) programının kullanılmasıdır. Bu programın tercih edilmesinin nedeni platformdan bağımsız web tarayıcı üzerinden çalışabilen, XML altyapısını kullanan ve hiyerarşik modellemeye olanak sağlayan, web üzerinden 3B etkileşimli dünyalar oluşturabilen, yapay zekâ (AI) ve makine öğrenimi (ML) için hizmet sağlayan avantajlı bir açık kaynak kod sistemi olmasıdır.

Sistemin metodolojisi, laboratuvar ortamında gerçekleştirilen simülasyonu, sistemin entegrasyonu ve gerçek ortamda uygulamalarını içeren bölümler aşağıda yer alan paragraflarda özetlenmiştir. Doğal afetlerle yaşamayı öğrenmemiz gereken bir ülkede varlığımızı sürdürdüğümüzü büyük bir acıyla hatırlatan 2023-Kahramanmaraş depremlerinin ardından, afet durumlarında doğru ve hızlı karar verebilmemizi sağlayacak sistemlere ihtiyacımız olduğunun bilinciyle yazdığımız bu tez çalışmasının gelecek çalışmalara katkı sağlayacağını umuyoruz.

Bu tez çalışmasının ikinci bölümünde uzaktan algılama teknolojileri ve LiDAR haritalama uygulamaları üzerine literatür bilgisi verilmiştir. Bu bölümde ayrıca LiDAR'ın temel bileşenleri, özellikleri ve uygulamaları ile lazerle mesafe ölçmenin temeli hakkında bilgiler verilmiştir.

Üçüncü bölümde, tez çalışması kapsamında geliştirdiğimiz Platformdan Bağımsız Web Tabanlı Gerçek Zamanlı LiDAR Haritalama Sisteminin yapısı ayrıntılı olarak irdelenmiş ve sistemin geliştirilmesi için kullanılan yöntemler verilmiştir. Platformdan bağımsız olarak tasarlanan bu sistemde veri elde etme, aktarma ve görselleştirme süreçleri aşamalarında kullanılan algoritmalar, yazılımlar, donanımlar tercih nedenleri ile birlikte verilmiştir.

Tezin dördüncü bölümü, geliştirilen yöntemin Simülasyon Platformu üzerinde uygulamaya konulması aşamalarını içermektedir. Laboratuvar ortamında simüle edilen bu sistem, istenilen uzaktan algılama platformuna uyarlanabilecek özelliklere sahiptir ve sınırları genişletilebilir. Bu bölümde, sistemin bu özellikleri de irdelenerek elde edilen LiDAR verileri ve oluşturulan gerçek zamanlı 3B haritalama sonuçları sunulmuştur.

Bu çalışmanın beşinci bölümünde, geliştirilen yöntem ve simülasyonları yapılan LiDAR sisteminin Elle Taşınabilir Platformda LiDAR Haritalama aşamaları ve gerçek ortamda uygulamalarına yer verilmiştir.

Bu çalışmanın altıncı bölümünde geliştirilen yöntemde gerçek ortam bileşenlerine uyarlanabilen LiDAR sisteminin, gerçek ortam koşullarında çeşitli uygulamalarda kullanmak amacıyla alçak irtifalı İHA platformuna (dron) entegrasyonu sağlama aşamalarına yer verilmiştir.

Son bölüm olan sonuçlar ve tartışma kısmında tüm tez çalışmasının kısa bir zeti verilerek çalışmanın yol açacağı sonuçlar değerlendirilmiştir. Bu tez çalışmasının gelecekte yapılacak olan çalışmalara katkısı ve öneriler üzerinde durulmuştur.

## **2. UZAKTAN ALGILAMA VE LiDAR HARİTALAMA**

Uzaktan algılama, yeryüzünün incelenmesinde bir nesneye doğrudan temas etmeden o nesneyle ilgili verilerin analiz yoluyla fiziksel özellikleri hakkında bilgi edinme bilimi olarak tanımlanır (Gibson, 2000; Lillesand ve diğ., 2015; Schowengerdt, 2012; Toth ve Józków, 2016). Uzaktan algılama tekniği ile yeryüzünün farklı uzaysal (mekânsal), spektral, radyometrik ve zamansal çözünürlüklerde görüntülenmesi ve izlenmesi mümkün olabilmektedir (Amani ve diğ., 2020; Levin ve diğ., 2020; Schowengerdt, 2012).

Uzaktan algılama sistemleri, dünyanın kısa/uzun vadeli değişimlerini ve insan faaliyetlerinin etkisini izlemek için oldukça önemli, tekrarlanabilen ve tutarlı bir görüntülerini sağlar (Amani ve diğ., 2020; Lechner ve diğ., 2020; Levin ve diğ., 2020; Sishodia ve diğ., 2020). Uzaktan algılama teknolojisinin çevresel değerlendirme ve izleme, küresel değişimin tespiti ve izlenmesi, tarım, meteoroloji, askeri gözetim/keşif ve haritalama gibi önemli uygulamaları bulunmaktadır (Örka ve diğ., 2022; Schowengerdt, 2012; Sishodia ve diğ., 2020).

Uzaktan algılama teknolojisinin uygulamalarından biri olan haritalama için uzaktan algılama verileri üretmede aktif ve pasif olarak sınıflandırılabilen birçok sistem bulunmaktadır (Tarekegn ve diğ., 2010; Toth ve Józków, 2016; Yu ve diğ., 2011). Çevre koşullarına daha az bağımlı ve haritalama için uzaktan algılama verileri üretmede aktif bir algılama sistemi olan Lazerle Görüntü Algılama ve Uzaklık Ölçümü (LiDAR) yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir (Tarekegn ve diğ., 2010; Toth ve Józków, 2016; Yu ve diğ., 2011).

Bu tez çalışmasında; platformdan bağımsız, web tabanlı, gerçek zamanlı bir LiDAR haritalama sisteminin tasarımı ve üretimi gerçekleştirilmiştir. Bu bölümde, geliştirilen bu sistemin temel bileşenleri, yöntemleri ve uygulamalarını içeren bir literatür bilgisi sunulmuştur.

### **2.1. Uzaktan Algılama Teknolojileri**

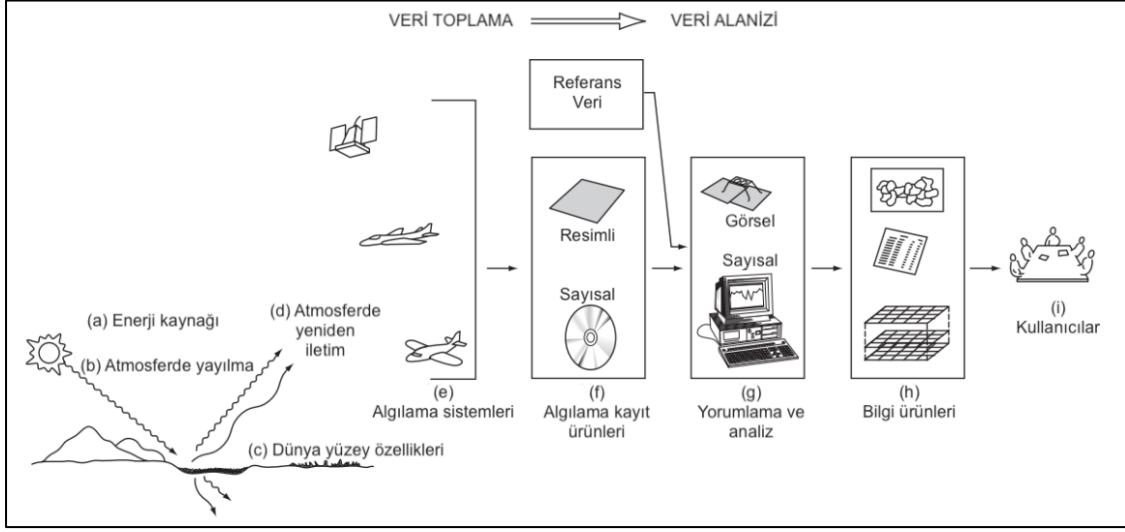
Uzaktan algılama teknolojisinin önemli uygulamalarından bazıları (Örka ve diğ., 2022; Schowengerdt, 2012; Sishodia ve diğ., 2020);

- Çevresel değerlendirme ve izleme (kentsel büyüme, deprem sonrası tespit, tehlikeli atık, vs.)
- Küresel değişimin tespiti ve izlenmesi (atmosferik, ozon tabakasının incelenmesi, ormansızlaşma, küresel ısınma, vs.)
- Tarım (mahsul durumu, verim tahmini, toprak erozyonu, vs.)
- Meteoroloji (atmosfer dinamiği, hava tahmini, vs.)
- Haritalama (topoğrafya, arazi kullanımı, inşaat mühendisliği, vs.)
- Askeri gözetim ve keşif (stratejik politika, taktik değerlendirme, vs.)

olarak ifade edilebilir. Bu uygulama alanlarında çalışan farklı veri kullanıcılarının ihtiyaçlarını karşılamak için, çok çeşitli uzaysal (mekânsal), spektral ve zamansal parametreler sunan birçok uzaktan algılama sistemi geliştirilmiştir (Amani ve diğ., 2020; Sishodia ve diğ., 2020). Örneğin, meteoroloji bilimi kullanıcılarına yüksek zamansal çözünürlüklü nispeten düşük uzaysal çözünürlüklü kapsama alanı gerekir. Haritalama için nadiren tekrarlayan kapsama alanı ile mümkün olan en yüksek uzaysal çözünürlük istenirken askeri gözetleme için yüksek uzaysal çözünürlük, yüksek zamansal çözünürlüklü kapsama alanı ve hızlı görüntü alımına ihtiyaç duyulur (Schowengerdt, 2012).

Öncesi kaldırıldı. Çünkü doğrudan Lidar a atıf yapıyordu. Bir referans da kaldırıldı. Uzaktan algılama teknolojileri 1960'lara kadar uzanan tutarlı geçmiş zaman veri seti sağlar. Bununla birlikte Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS), gelişmiş Küresel Konumlandırma Uydu Sistemleri (Global Navigation Satellite System: GNSS), eylemsizlik ölçüm birimi ve hassas jiroskop (IMU) teknolojilerinin bir arada kullanılması ile elde edilen veriler, arazi örtüsü değişimleri, arazi kullanımı ve kentsel alanların haritalanması için analiz ve modellemede daha etkin bir şekilde kullanılmaktadır (Hoffhine Wilson ve diğ., 2003; Xiao ve diğ., 2006; Carter ve diğ., 2012; Dutton, 2015). Bu sistemlerdeki teknolojik gelişmeler, son yıllarda küresel ölçekte orman ekolojisi yönetimi ve su kullanımı ile ilgili çalışmaların sayısını artırmaktadır (Calera ve diğ., 2017; D. Jiang ve Wang, 2019).

Uzaktan algılama alıcıları elektromanyetik (EM) dalgaları kullanır. Dünya kaynaklarının uzaktan algılanmasında yer alan genelleştirilmiş süreçler ve unsurlar Şekil 2.1'de şematik olarak gösterilmektedir.



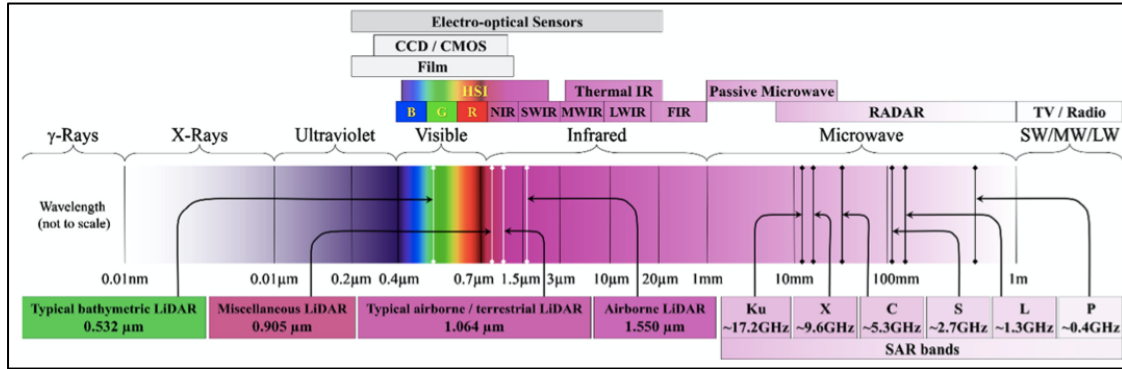
Şekil 2.1. EM dalga kullanılan uzaktan algılama süreci (Lillesand ve diğ., 2015)

Uzaktan algılamada veri toplama ve veri analizi, birbiri ile ilişkili iki temel süreçtir. Şekil 2.1’de görüldüğü gibi veri toplama süreci, sırasıyla (a) enerji kaynakları, (b) atmosferde enerjinin yayılması, (c) dünya yüzey özellikleri ile enerji etkileşimleri, (d) enerjinin atmosfer boyunca yeniden iletimi, (e) havadan ve/veya uzaydan algılayıcılar, (f) algılayıcı verilerinin resimsel ve/veya sayısal formda üretilmesi ilgili unsurlarını içerir. Burada, dünya yüzey özelliklerinin elektromanyetik enerjiyi yansıtma ve yayma şeklindeki değişikliklerini kaydetmek için algılayıcılar kullanılır. Veri analiz süreci ise resimsel verileri ve/veya sayısal algılayıcı verilerini analiz etmek (g) için yorumlama cihazları ve görüntüleme araçları kullanarak verileri incelemeyi içerir. İki temel süreç sonucu elde edilen bilgi ürünleri (h), kullanıcılara (i) iletilir (Lillesand ve diğ., 2015).

Güneş gibi başka bir kaynaktan gelen ışınların cisimlere çarptıktan sonra ilgili platforma ulaşarak elde edilen algılama yöntemi pasif algılama sistemi, platformun kendi kaynakları ile yaptığı algılama yöntemi de aktif algılama sistemi olarak tanımlanır (Duran ve Üstündağ, 2008; Toth ve Józków, 2016)

Aktif algılama genel olarak daha iyi gözlem yetenekleri sağlayabilir. Çünkü algılayıcılar uzaktan algılama hedeflerine yönelik daha yönlendirilebilir ve hedeflenebilir. Ayrıca çevre koşullarına daha az bağımlıdır. Haritalama için uzaktan algılama verileri üretmede LiDAR, Multi Spektral (MS: Multispectral), Hiper Spektral Görüntüleme (HSI: Hyperspectral Image), Sentetik Açıklıklı Radar (SAR: Synthetic Aperture Radar) ve İnterferometrik Sentetik Açıklıklı Radar (InSAR) sistemleri yaygın olarak

kullanılmaktadır (Tarekegn ve diğ., 2010; Toth ve Józków, 2016; Yu ve diğ., 2011). Şekil 2.2’de elektromanyetik spektrumun farklı bant aralıklarına karşılık gelen uzaktan algılama veri toplama sistemleri görülmektedir.



Şekil 2.2. Uzaktan algılama veri toplama sistemlerinin bant aralıkları ve elektromanyetik spektrumundaki yerleri (Toth ve Józków, 2016)

## 2.2. Uzaktan Algılama ve LiDAR

Uzaktan algılama sistemleri arasında gözlem yeteneği daha fazla olan, uzaktan algılama hedeflerine doğrudan yönlendirilebilen/hedeflendirilebilen, çevre koşullarına daha az bağımlı bir aktif algılama sistemi olan LiDAR (Lazerle Görüntü Algılama ve Uzaklık Ölçümü) haritalama için uzaktan algılama verileri üretmede yaygın olarak kullanılmaktadır (Tarekegn ve diğ., 2010; Toth ve Józków, 2016; Yu ve diğ., 2011). Son yıllarda, yeryüzünde en hızlı değişimlerin gözlemlendiği kentsel alanların (binalar, yollar, bitki örtüsü vs.) incelenmesinde hava araçları veya uydular tarafından elde edilen LiDAR verilerinin kullanımı diğer aktif algılama sistemlerine göre daha fazla tercih edilmektedir (Awad, 2017; Roering ve diğ., 2013; Yao ve diğ., 2019).

LiDAR, temel olarak bir hava aracından gönderilen lazer atımı ile yansıtıcı nesnenin (yeryüzü, ağaç, araba vb.) üç boyutlu konumunu (x, y, z koordinatları) ölçen bir sistemdir. Ölçme işlemi, lazer atımı gönderilme açısı ve hava aracının konumunun (GNSS ve IMU desteğiyle) eş zamanlı olarak hava aracında kayıt edilmesi ile gerçekleştirilir (Lim ve diğ., 2003; Carter ve diğ., 2012; Dutton, 2015). Büyük ve sürekli alanlar üzerinde LiDAR verilerini (3B nokta bulutu) elde etmek için kullanılan platformlar uçaklar, uydular ve helikopterlerdir (Toth ve Józków, 2016). LiDAR sistemlerinin uydu platformlarında kullanıldığı uygulamalarda, uyduların Dünya'nın yörüngesinde çok büyük mesafelerde

(yükseklikler) ve çok yüksek hızlarda (29.000 km/s) hareket ediyor olmaları nedeniyle sadece lazer profil oluşturucular kullanılabilir. Mevcut lazer uygulama teknolojisindeki sınırlamalar nedeniyle de LiDAR'ın temelini oluşturan lazer tarayıcılar henüz uzay araçlarından kullanılamamaktadır. Ayrıca yeryüzü ile uydu arasındaki bulutlar da profil çıkarmaya izin vermemektedir. Sonuç olarak LiDAR sistemleri yüksek hızlarda ve yüksek irtifalarda taşındıkça çözünürlük, hassasiyet azalmakta ve maliyet artmaktadır (Shan ve Toth, 2012). Çoğu LiDAR yakın kızılötesi (NIR) ışınması kullandığından su, asfalt, katran, bulutlar ve sis gibi belli maddeler ve yüzeyler yakın kızılötesi dalga boylarını soğurarak değersiz veya zayıf sinyal dönüşlerine sebep olur. Özellikle yüksek irtifalı platformlardan (uçaklar, uydular) sis ve bulutlardan dolayı sağlıklı veri elde etme zorlaşmaktadır (Lim ve diğ., 2003; Carter ve diğ., 2012; Dutton, 2015).

Yüksek maliyetli, veri toplama açısından esnek olmayan insanlı hava LiDAR sistemlerinin uzaysal ve zamansal çözünürlükleri, özellikle küçük alanlarda yüksek çözünürlüklü veri toplarken sınırlıdır (Li ve diğ., 2019; Yang ve Chen, 2015). Daha küçük alanlar için daha yüksek veri yoğunluğu gerektiğinde, uzaysal ve zamansal çözünürlüğü yüksek veri sağlayan alçak irtifalı İHA sistemleri, düşük maliyetli ve esnek veri toplama gibi özelliklerinden dolayı çeşitli uygulamalarda yaygın olarak kullanılan bir uzaktan algılama platformu haline gelmiştir (S. Jiang ve diğ., 2017, 2020; Fuad ve diğ., 2018; Sofonia ve diğ., 2019; Yao ve diğ., 2019). İnsanlı hava LiDAR platformları yüksekliklerine göre 15-30 cm civarında doğruluk değerlerine sahiptir. Bunun yanı sıra göreceli doğruluk (örneğin, tepe yükseklikleri, kumsallar, kum tepeleri) daha da iyidir (Carter ve diğ., 2012). Görüntü algılama teknolojilerindeki ve veri alma süreçlerindeki gelişmeler alçak irtifalı İHA LiDAR'ın haritalama, ormancılık, tarım, bina ve enerji hattı modelleme gibi alanlarındaki uygulama yelpazesini genişletmiştir (Fuad ve diğ., 2018; Sofonia ve diğ., 2019).

Alçak irtifalı İHA LiDAR sistemleri, yüksek irtifalı sistemlere göre tercih edilir olmalarının yanı sıra bazı durumlarda hala iyileştirilmesi gereken sorunlara da sahiptirler. LiDAR verilerinin doğru ve zamanında elde edilmesi, çevresel değişimin izlenmesi ve afet sonrası acil durum müdahalesi için hayati önem taşımaktadır (Awrangjeb, 2015). Bu süreçlerde kullanmak üzere belli bir bölge (sokak, şehir) üzerinden farklı dönemlerde elde

edilen LiDAR verileri önemli bir kaynak oluşturur (He ve diğ., 2016). Ancak, her uçuştan sonra yer istasyonunda LiDAR verilerinin incelenmesi ve kullanılabilir hale getirilmesi bir dizi süreç/adım ve zamansal süreçlerden geçer (Meng ve diğ., 2010). Ayrıca alçak irtifalı İHA LiDAR sisteminin hassas ölçekte 3B nokta bulut için uygunluğu değerlendirilirken, uçuşların sistematik olmayışı, uçuş parametrelerinin potansiyel etkilerinin anlaşılmasıyla birlikte tekrarlanabilirlik ve karşılaştırılabilirlik sınırlamalarıyla karşılaşmaktadır (Tulldahl ve diğ., 2015). Bu durumu iyileştirmek için uzun süren uçuş planlamaları, otopilot sistemleri, düzenli yörünge belirleme, uçuş sonrası veri işleme süreçleri gibi bir dizi çalışmalar gerçekleştirilmiştir (Thiel ve Schmulius, 2016; Sofonia ve diğ., 2019). Bu tez çalışmasında da burada verilen sorunlara çözüm getirebilmek amacıyla afet durumlarında hızlı müdahaleye olanak veren bir alçak irtifalı İHA LiDAR sisteminin metodolojisi geliştirilmiştir.

### **2.3. LiDAR ve Temel Bileşenleri**

Bu bölümde, LiDAR teknolojisinin altında yatan fiziksel ilkeler incelendi. Lazerler, algılayıcılar, tarayıcılar ve konumlandırma sistemleri dahil olmak üzere LiDAR sistemlerini oluşturan farklı donanım bileşenleri hakkında bilgi verildi. Bu bileşenlerin özelliklerini ve çalışma ilkelerini anlamak, LiDAR verilerini işlemek ve doğru 3B modeller oluşturmak için çok önemlidir. LiDAR'ın temel bileşenleri, özellikleri, veri işleme ve kullanım alanları tezin çalışma konusu ile ilişkilendirilerek verilmiştir.

Lazerle Görüntü Algılama ve Uzaklık Ölçümü (LiDAR) sistemi, aktif algılayıcı (active sensor) sınıfında kategorilendirilir. Bu sistemlerde nesneyi algılamak için enerji, algılayıcı (lazer vs.) tarafından oluşturulur. LiDAR sistemleri, uzaktan algılama, ölçme, haritalama ve otonom araçlar dahil olmak üzere çok çeşitli uygulamalar için çok önemli bir teknolojidir. Bu sistemler, mesafeleri ölçmek ve ortamın hassas 3B modellerini oluşturmak için lazer ışığı kullanır. Bununla birlikte, LiDAR sistemlerinin geliştirilmesi ve işletilmesi, optoelektronik, makine mühendisliği, navigasyon ve bilgisayar bilimi dahil olmak üzere birçok disiplinin derinlemesine anlaşılmasını gerektirir.

LiDAR'ın temel tasarımı Şekil 2.3'te görüldüğü gibi basitçe şöyledir: i) konumu bilinen bir hava aracından gönderilen bir lazer atımı bir nesneye çarparak geri döner ve dönme zamanı ölçülür, ii) hava aracının hareket süresi de hesaba katılarak lazer atımının ne kadar

yol aldığı saptanır, iii) lazer açısı kayıt edilir, iv) bu bilgiler kullanılarak yansıtıcı nesnenin (örneğin yeryüzü, ağaç, araba gibi) üç boyutlu konumu (x, y, z koordinatları) hesaplanır (Carter ve diğ., 2012; Dutton, 2015; Lim ve diğ., 2003).

Bir LiDAR sistemi hava ve yer kısımlarını içeren iki ana bölümden oluşur (Şekil 2.3). Sistemin hava kısmı;

- Hava platformu
- LiDAR
- Konum ve yönlendirme sistemi (KYS: GNSS ve IMU)

olmak üzere üç ana unsurdan oluşur. Yer kısmı ise;

- Küresel konumlandırma Uydu sistemi (GNSS) referans istasyonu
- Çevrimdışı olarak çalışan eş zamanlama ve kayıt için uygun donanım ve yazılımla veri işleme

alt bölümlerini içerir.

LiDAR teknolojisi genellikle uydular, uçaklar, helikopterler ve alçak irtifalı İHA platformlarında kullanılmaktadır. Havadan LiDAR sistemini taşıyan platform uçuş planına göre bir örnek görüş hattı boyunca ilerler. Bu esnada lazer tarama sistemi uygun açılara göre tarama yaparak elde ettiği veriler merkezi kontrol ve kayıt birimi tarafından kayıt edilir. Bu sistemlerde yüksek doğruluk düzeyi sağlamak için; hava aracının kesin konumunu belirlemede kullanılan gelişmiş küresel konumlandırma sistemi (GNSS), eylemsizlik ölçüm birimi (IMU) ya da eylemsizlik gezinim/seyrüsefer sistemi (Inertial Navigation System: INS) ve hassas jiroskop teknolojileri bir arada kullanılır (Carter ve diğ., 2012; Dutton, 2015). Konum belirleyici sistemler tüm yönlerde hareket ölçümü yeteneğine sahip olup kısa bir süre sonra (örneğin 1 saniye) etkili değildirler ve hassasiyet kaybına neden olurlar. Burada, GNSS uydularından gelen çeşitli işaret (signal) türlerini kaydeden GNSS ünitesi, INS veya IMU'yu her saniye veya daha fazla sürede "güncellemek veya sıfırlamak" için kullanılır. GNSS konumları, uçak tarafından ve ayrıca bilinen bir konuma sahip bir yer istasyonunda kaydedilir. Yer istasyonu, hava aracı tarafından kayıt edilen GNSS konumuna bir düzeltme katsayısı eklemesiyle yüksek doğrulukta konum ayarlaması yapar (Carter ve diğ., 2012). LiDAR sistemi ile edilen nokta bulutları, ArcGIS, LAStool, Orbit GT, VRMesh, Global Mapper vb. gibi yazılımlar kullanılarak rasterleştirme (resimleştirme) işlemine tabi tutulur ve sayısal yükseklik

The diagram illustrates the LazerScan system architecture, divided into three main sections: HAVA KISMI (Air Part), YER KISMI (Ground Part), and VERİ İŞLEME (Data Processing).

**HAVA KISMI (Air Part):** This section shows an aircraft equipped with a GPS-Zamanlama pps (GPS Timing) system, an IMU (Inertial Measurement Unit), and a GPS receiver. The aircraft is also connected to a central control unit (MERKEZİ KONTROL ve KAYIT BİRİMİ) via a laser beam. The central unit is connected to a LAZER VERİ (Laser Data) storage unit and an OPTO-MEK. TARAYICI (Opto-Mechanical Scanner) unit. The scanner is connected to a MESAFE ÖLÇÜM BİRİMİ (Distance Measurement Unit).

**YER KISMI (Ground Part):** This section shows a GPS Referans İstasyonu (GPS Reference Station) and a central control unit (MERKEZİ KONTROL ve KAYIT BİRİMİ) connected to a LAZER VERİ (Laser Data) storage unit. The central unit is also connected to an OPTO-MEK. TARAYICI (Opto-Mechanical Scanner) unit and a MESAFE ÖLÇÜM BİRİMİ (Distance Measurement Unit).

**VERİ İŞLEME (Data Processing):** This section shows the data flow from the aircraft to the ground station. The data is processed through several steps: GPS Ref. (GPS Reference), KYS Veri (KYS Data), Birleştirilmiş KYS Çözümü (Combined KYS Solution), Lazer Veri (Laser Data), Kayıtlı lazer verileri (Recorded laser data), Rasterleştirilmiş SYM (Rasterized SYM), and SYÜM Üretimi (SYÜM Production). The final output is Ürün Teslimatı (Product Delivery).

11

### 2.3.1. Lazerler ve Özellikleri

LiDAR sistemleri, mesafeleri ölçmek ve ortamın hassas 3B modellerini oluşturmak için lazer ışığı kullanır. LAZER, “Laser Amplification by the Stimulated Emission of Radiation” ifadesindeki kelimelerin baş harfleri kullanılarak “LASER” diye adlandırılan bir cihazdır. Uyarılmış yayılma ile ışığın güçlendirilmesi ilkesine dayanan lazer, temel olarak, harici bir enerji kaynağı tarafından etkinleştirildiğinde, tüm fotonların/dalgaların uyumlu ve aynı fazda olduğu tek renkli ışın veya atım üreten bir optik cihazdır. Lazer ışını tek renklilik, yönlendirilebilirlik ve şiddet özellikleri bakımından normal ışık kaynaklarından ayrılmaktadır (Candan, 2008). Elektromanyetik spektrumun x-ışını bölgesinden mikro dalgaya uzanan geniş bir aralıkta farklı dalga boylarına, ms (milisaniye)’den as (attosaniye)’ye değişen atım sürelerinde ve mW (miliWatt)’tan MW (MegaWatt)’a kadar değişen güçlerde çok çeşitli lazerler mevcuttur. Lazerler genellikle aktif ortam türüne göre gaz lazerleri, katı hal lazerleri ve yarı iletken lazerler olarak sınıflandırılırlar (Candan, 2008; Shan ve Toth, 2012). Aktif ortam türü yanında, atımlı/sürekli; yüksek güçlü/düşük güçlü veya dalga boyu belirtme şeklinde de sınıflandırılırlar. Uzaktan algılama için, düşük sapma derecesine, kısa ve yüksek enerjili atımlara sahip lazerler gereklidir. Lazerler, bir hedefin hem spektral analizi hem de mesafe ölçümü için kullanılabilir. Bu çalışmada, lazerin ikinci özelliği olan mesafe ölçümüne odaklanıldı. Bu nedenle, LiDAR terimi genellikle mesafe ölçümü veya topoğrafik LiDAR anlamında kullanıldı.

Topoğrafik haritalama amacıyla kullanılan lazerle mesafe ölçme, profil çıkarma ve tarama işlemleri için uzun mesafelerde sık aralıklı mesafe ölçümü yapılır. Bu işlemleri gerçekleştirmek için çok yüksek enerji seviyeleri gereklidir. Bu amaçla yüksek yoğunluk, keskinlik ve yüksek derece yönlendirme gibi niteliklere sahip katı hal ve yarı iletken lazerlerinin kullanımı tercih edilir (Shan ve Toth, 2012).

### 2.3.2. Lazerle Mesafe Ölçme

Lazer telemetri olarak da anılan Lazer mesafe ölçerler (LMÖ), mesafeyi doğru bir şekilde ölçmek için gerekli araçlardır. Mesafe ya da aralık ölçümü zamanın hassas ölçümü temeline dayanır. Kesin zaman ölçümüne dayalı olan bu işlem, yansıyan lazer atımını ve yansıyan sürekli bir lazer ışın demetinin faz farkını temel alan iki ana yöntemden biri

kullanılarak gerçekleştirilebilir (Shan ve Toth, 2012; Telling ve diğ., 2017; Guo ve diğ., 2023). Bu bölümde, lazer mesafe ölçerin çalışma ilkeleri, bileşenleri, mesafe bulma teknikleri ve uygulamaları ele alındı.

### 2.3.2.1. Lazer Atım Temelli Ölçüm

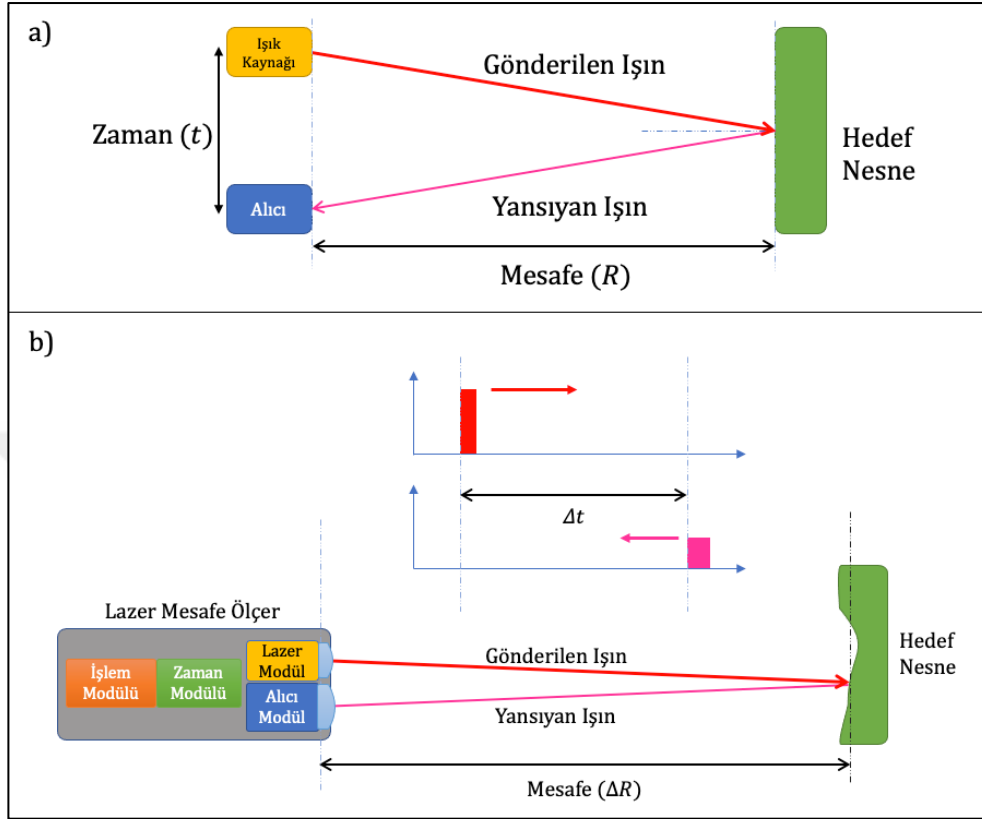
Işığın hızının belirlenmesi için Michelson, Fizeau ve diğerleri ışığın bir kaynaktan uzak bir noktaya gönderilmesi ve gönderilen noktadan geriye gelme süresini hassas bir şekilde ölçtüler (Forrester ve Hulme, 1981). Optik bir ışın için bu süre uçuş süresi (TOF: Time of Flight) olarak adlandırılır. Işığın boşluktaki hızı, tam olarak saniyede 299.792.458 metreye (yaklaşık olarak saniyede 300.000 km/s) eşit olan evrensel bir fiziksel sabittir. Yaygın olarak  $c$  ile gösterilir. Işığın havadaki hızı sabit olduğundan ışık kaynağı ile bir nesne arasındaki mesafe, yayılan ışık sinyalinin geriye gelme süresi kaydedilerek ölçülür ve Denk (2.1) ile hesaplanır (Şekil 2.4a):

$$R = \frac{1}{2} * \frac{c}{n} * t \quad (2.1)$$

burada,  $R$ : alıcı ya da ışık kaynağı ile nesne arasındaki mesafe,  $c$  ışığın boşluktaki hızı,  $n$  ışığın içinden geçtiği ortamın kırılma indisi (hava için  $n = 1$ ) ve  $t$ : kaynaktan ölçülen yüzeye gidiş-dönüş uçuş süresidir (Shan ve Toth, 2012; Telling ve diğ., 2017; Dong ve Chen, 2017; Guo ve diğ., 2023). Burada ışık kaynağı olarak bir lazer kullanıldığında lazer mesafe ölçer olarak adlandırılır. Bir lazer mesafe ölçer (LMÖ), bir hedefin mesafesini hassas şekilde ölçen optik bir cihazdır. Bu cihazlar yüksek derecede doğruluğa sahiptir. Bir LMÖ hedef tarafından geri yansıtılan bir lazer ışını yayar ve gidiş-dönüş için geçen süreyi ölçerek mesafeyi hesaplar (Besl ve diğ., 1985; Shan ve Toth, 2012; Guo ve diğ., 2023). LMÖ'ler, ölçme, askeri hedefleme, robotik ve otonom araçlar gibi çeşitli uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır (Besl ve diğ., 1985).

Mesafe ya da aralık ölçümü zamanın hassas ölçümü temeline dayanır. Zamanı hassas ölçme yöntemlerinden ilki çok kısa olan uçuş süresinin (TOF: Time of Flight) ölçülmesidir. Bu süre; lazer mesafe ölçerden gönderilen lazer atımının, gönderildiği andan itibaren nesneye çarptıktan sonra yansıyarak tekrar aygıtı gelmesi için geçen süredir (Guo ve diğ., 2023; Shan ve Toth, 2012; Telling ve diğ., 2017). Şekil 2.4b'de bir lazer mesafe ölçerin atım gönderme işlemi görülmektedir. LMÖ tarafından yayınlanan

atımın, hedef nesneye çarptıktan sonra yansıyarak tekrar LMÖ alıcısına gelmesi için geçen süre ( $\Delta t$ ) LMÖ'nün zaman modülü ile ölçülür.



Şekil 2.4. a) Işık kaynağı kullanarak mesafe ölçümü yöntemi. b) Lazer mesafe ölçer kullanarak mesafe ölçümü (TOF yöntemi)

LMÖ'nün mesafe ölçümü, lazer atım yayını, gelen lazer atımı algılama ve her iki atım arasındaki zaman ölçümü adımlarından oluşur (Guo ve diğ., 2023). Zaman ölçümüyle elde edilen  $\Delta t$  değeri kullanılarak hedef nesnenin LMÖ'den olan mesafesi ( $R$ ) işlem modülü üzerinde hesaplanır. Elde edilen bir dizi mesafe değeriyle, işlem modülü üzerinde (Denk 2.2) kullanılarak çözünürlük değeri hesaplanır. Bu çözünürlük değeri, LMÖ'nün hedef nesneleri ayırt edebilme yeteneğini ifade eder:

$$\Delta R = \frac{1}{2} * \frac{c}{n} * \Delta t \quad (2.2)$$

burada;  $\Delta R$ : mesafe çözünürlüğü (doğruluğu/hassasiyeti) ve  $\Delta t$ : sistemden ölçülen yüzeye gidiş-dönüş uçuş süresidir. Işığın hızı çok iyi bir doğrulukla bilindiğinden pratikte mesafe doğruluğu ya da çözünürlük, zaman ölçümünün doğruluğu olarak tanımlanır (Shan ve Toth, 2012; Dong ve Chen, 2017).

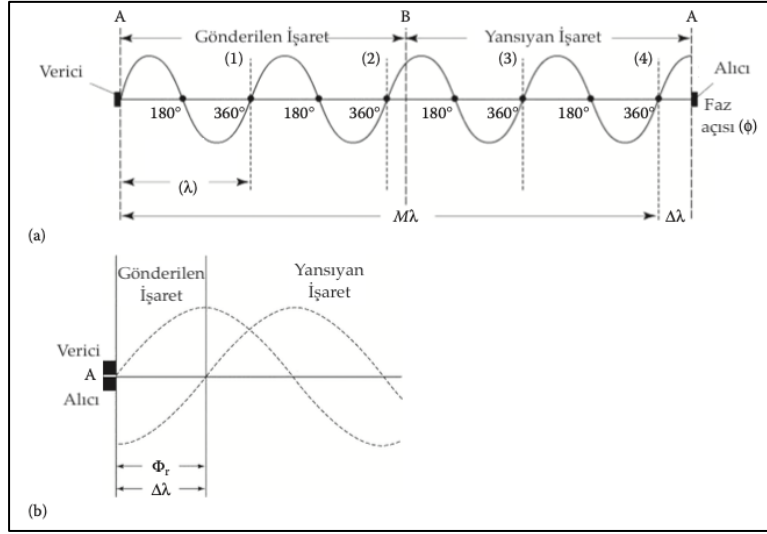
### 2.3.2.2. Lazer Faz Temelli Ölçüm

Bu yöntemde, sürekli bir dalga ile lazer modüle edilerek iletilen ve yansıyan dalgalar arasındaki faz farkı ölçülerek mesafe hesaplanır. Bu durumda, bu yayılan ışının sinüs dalgasının iletilen ve alınan sürümlerinin şekilleri karşılaştırarak aralık değeri elde edilir ve aralarındaki faz farkı ölçülür (Telling ve diğ., 2017; Guo ve diğ., 2023). Yansıtılan lazer ışın demetinin taşıyıcı sinyalinin dalga boyu ( $\lambda$ ) oldukça kısadır ve tipik olarak yaklaşık  $1 \mu\text{m}$ 'dir. Topoğrafik haritalama uygulamalarında böyle bir ölçme doğruluğuna ihtiyaç duyulmadığından, modülasyon sinyali dalga deseni taşıyıcı sinyal üzerine bindirilir ve faz farkının hassas ölçüldüğü bir yöntem kullanılır (Guo ve diğ., 2023). Böylece, lazer ışının genliği (ya da şiddeti), periyodu  $T_m$  ve dalga boyu  $\lambda_m$  olan bir sinüzoidal sinyal ile modüle edilir (Shan ve Toth, 2012; Telling ve diğ., 2017). Bakılan yüzeyden ölçülen  $R$  mesafesi, LMÖ'den yayılan sinyal ile hedef nesneden yansıyarak alıcıya ulaşan sinyal arasındaki faz farkının (ya da faz açısı,  $\varphi$ ) doğru ölçümü ile hesaplanır. Bu faz ölçme işlemi genellikle bir sayısal atım sayımı tekniği kullanılarak gerçekleştirilir. Bu, toplam mesafenin küçük bir kısmını ( $\Delta\lambda$ ) verir (Şekil 2.5). Modülasyon modeli değiştirilerek, dalgaboylarının tam sayısı ( $M$ ) belirlenir ve son bakılan mesafe aralığını ( $R$ ) elde etmek için küçük değerlere eklenir;

$$R = (M\lambda + \Delta\lambda)/2 \quad (2.3)$$

burada  $M$ : dalgaboylarının tam sayı değeri,  $\lambda$ : dalgaboyunun bilinen değeri,  $\Delta\lambda$ : dalga boyunun çok küçük bir kısmı ve  $\Delta\lambda = (\varphi/2\pi) \cdot \lambda$  olup,  $\varphi$ : faz açısıdır.

Lazer atım temelli yöntem ile karşılaştırıldığında, faz lazer aralığı, genellikle milimetre düzeyinde olmak üzere daha yüksek ölçüm doğruluğu avantajına sahiptir. Bunun yanında, lazer yayınlama enerjisinin sınırlamaları nedeniyle algılama mesafesi 100 m'nin altındadır (Telling ve diğ., 2017; Guo ve diğ., 2023).



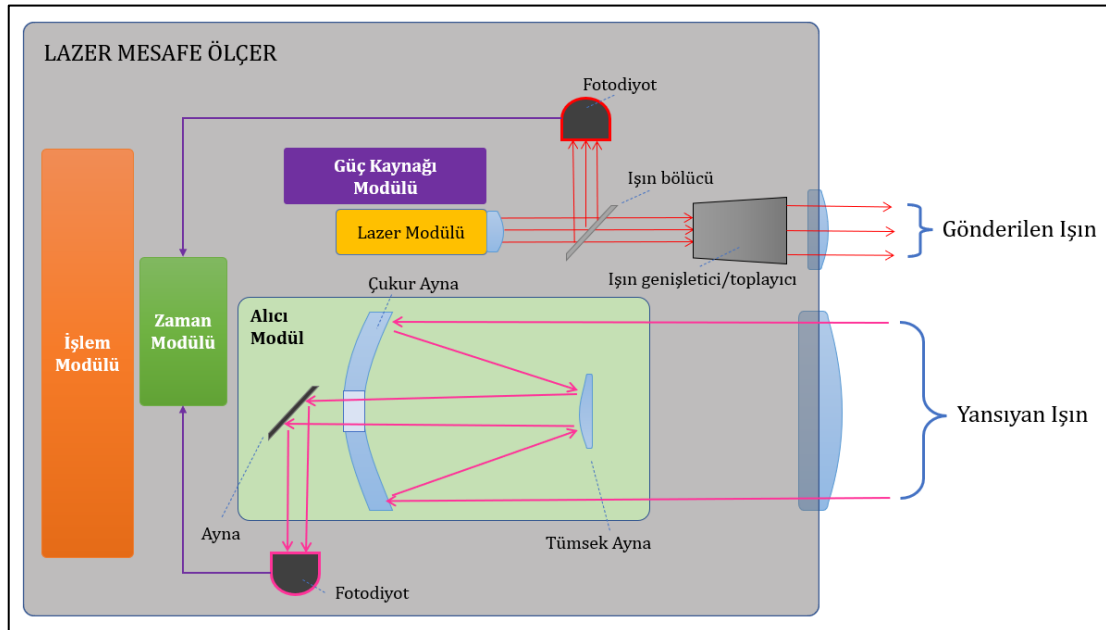
Şekil 2.5. a) Bir CW (Sürekli) lazerden yayılan ve cisimden yansıyan sinyaller arasında faz karşılaştırması ve b) iki sinyal arasındaki faz karşılaştırması (Shan ve Toth, 2012)

### 2.3.3. Lazer Mesafe Ölçerin Yapısı

Bölüm 2.3.2.1’de tartışıldığı gibi, ölçüm cihazından bir nesneye olan mesafeyi belirlemek için kullanılan TOF yöntemi, çok kısa bir lazer atımının hedefe gidip geri gelmesi için gereken sürenin çok doğru bir şekilde ölçülmesini içerir (Zhu ve diğ., 2012; Guo ve diğ., 2023). Bu yöntem, karasal veya yer tabanlı LMÖ’ler, profil oluşturucular ve tarayıcılar söz konusu olduğunda birkaç on veya yüzlerce metrelik mesafeleri ölçmek için kullanılmaktadır. Bir hava platformundan ölçülen yüzeylere olan mesafeler, yüzlerce metreden birkaç kilometreye kadar değişecektir. Bunun yanında uzay mekiği ve uydular gibi uzay platformlarına monte edilen mesafe ölçer cihazları birkaç yüz kilometrelik mesafeleri ölçer (Shan ve Toth, 2012).

Uygun hassasiyette bir TOF lazer mesafe ölçer optik ve elektronik iki ana bileşenden oluşur (Zhu ve diğ., 2012; Raj ve diğ., 2020). Optik bileşenler diyot lazer, ışın genişletici (beam expander), ışın toplayıcı (collimator), teleskop ve algılayıcı (fotodiyot) olarak ifade edilebilir. Bu optik bileşenlerin uyumlu çalışması ve verilerin elde edilmesi için kullanılan elektronik bileşenler ise zamanlayıcı (timer), denetleyici (controller), güç kaynağı (power supply), işlem modülü (microprocessor) ve veri kayıt/görüntüleme (data record/display) olarak ifade edilebilir. Belirli bir cihazda kullanılacak gerçek tasarım ve belirli bileşenler yer temelli, hava veya uzay platformundan çalıştırılıp çalıştırılmadığına bağlı olarak söz konusu uygulamaya göre belirlenir (Shan ve Toth, 2012).

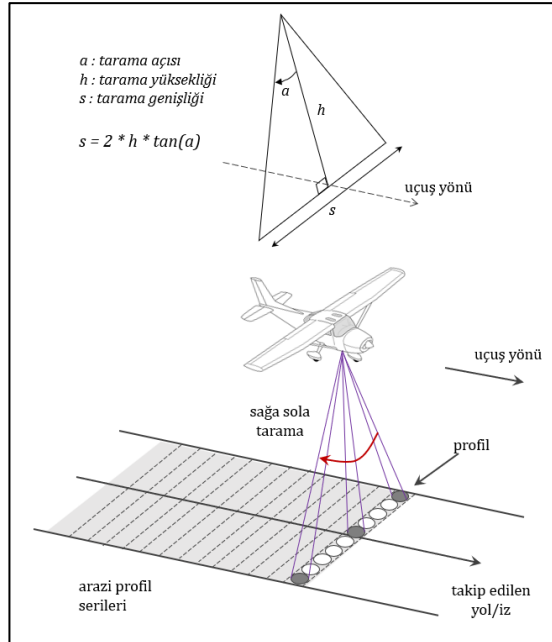
Günümüzde tipik bir lazer mesafe ölçer tasarımı Şekil 2.6’da verilmiştir. Lazer modülü (diyot lazer), lazer atımını yönlendirme merceği ve odaklama merceği gibi optik bileşenler ile hedef nesneye odaklanacak şekilde nesneye doğru gönderir. Bu gönderilme işleminde atım yayıldığında, enerjisinin küçük bir kısmı bir ışın ayırıcı tarafından zaman modülünü tetikleyen bir fotodiyota yönlendirilir (Shan ve Toth, 2012). Fotodiyotun tetiklemesi ile zaman modülünde başlangıç olarak kabul edilen zaman ( $t = t_1 = 0$ ) başlatılarak işlem modülüne bildirilir ve atımın dönüşüne kadar geçen süreyi ölçer. Gönderilen lazer atımı hedef yüzeyinden yansıyarak alıcı modüle geri döner. Alıcı modülde lazer atımının yansımaları algılamak için odaklama merceği gibi optik bileşenler kullanılır. Yansıyan atım alıcıya geri döndüğü anda ikinci bir fotodiyotun tetiklemesi ile zaman modülünde dönüş zamanı olarak kabul edilen zaman ( $t = t_2$ ) ölçülerek işlem modülüne bildirilir. İşlem modülü her bir atımın gönderilmesi-yansıması arasındaki zaman farkı ( $t_2 - t_1$ ) verilerini alır ve hedefin LMÖ’den olan mesafesini hesaplar. Bu süreçte çeşitli yükselteç ve zamanı dijitale dönüştürücüler de kullanılır. İşlem modülünün hesaplama yapma, birim dönüştürme ve verilerin depolanması gibi işlevleri yerine getirebilir. Güç kaynağı modülü ise çoklu voltaj gereksinimlerini karşılamak için düzenleyiciler içeren LMÖ sistemi için gerekli gücü üretir. (Zhu ve diğ., 2012; Toth ve Józków, 2016; Raj ve diğ., 2020). LMÖ’ler, genellikle hızlı, hassas ve kullanımı kolaydır. Ölçüm aralığı ve doğruluk, cihazın kalitesine bağlı olarak değişebilir.



Şekil 2.6. Lazer mesafe ölçerin ana bileşenlerinin şematik görünümü

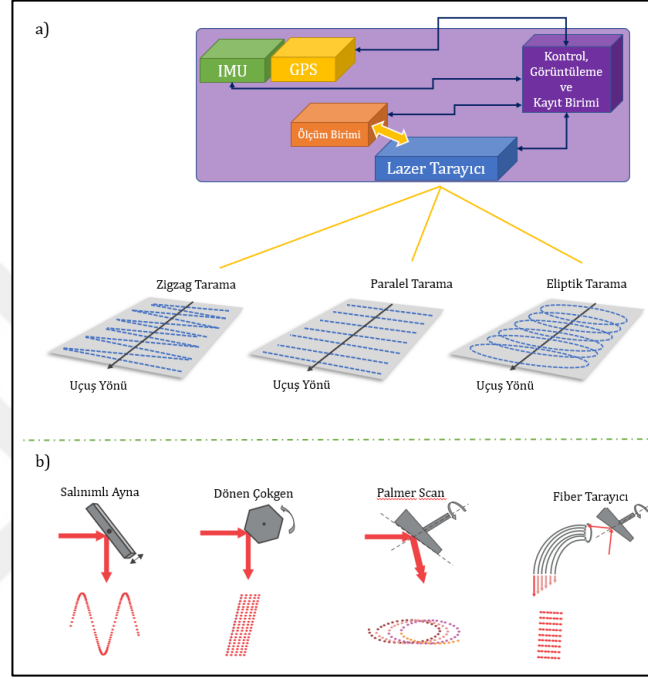
### 2.3.4. Lazerle Tarama

Lazer mesafe ölçere dönen bir ayna veya prizma gibi bir tarama mekanizması eklenerek bir alanın topoğrafik özelliklerini ölçebilen ve harita haline getirebilen bir tarayıcı elde edilir (Shan ve Toth, 2012; Raj ve diğ., 2020; Guo ve diğ., 2023). Karasal ya da yer temelli bir lazer tarayıcı sisteminde, platformun konumu sabittir. Bu nedenle bir arazinin alanını taramak için iki yönde hareket gereklidir. Havadan veya uzay aracından taşınan profil oluşturucularda, platformun ileri hareketi ikinci boyut sağlarken uçuş hattına dikey yönde bir dizi profil ölçümü ile alan taraması elde edilir (Shan ve Toth, 2012). Lazer mesafe ölçerlere yansıtıcı bir ayna veya prizma eklenerek, açısal dönme değerleri bir açısal kodlayıcı kullanılarak kesin ve sürekli bir tarama mekanizması sağlanır. Bu tarama mekanizması, lazer mesafe ölçerin yan veya çapraz yönde arazi profillerini ölçmesini mümkün kılar. Böylece, uçuş hattı boyunca tamamlanan uzunlamasına profilin yanında, çizgi boyunca ölçümler gerçekleştirilir (Lim ve diğ., 2003). Hava ya da uzay aracında çalışan profil oluşturucu tarafından üretilen, küçük bir alanı ya da karasal alanı kapsayan uçuş hattının yer izi boyunca ölçülen yükseklik değerleri seti sayesinde, LiDAR nokta bulutu olarak adlandırılan bir ağ noktasının konumları ve yükseltileri elde edilir (Şekil 2.7) (Shan ve Toth, 2012).



Şekil 2.7. Hareket doğrultusuna dik yönde kontrol edilebilir açıyla tarama yapabilen hava platformu üzerine yerleştirilen lazer profil oluşturucunun şematik gösterimi (Lim ve diğ., 2003; Shan ve Toth, 2012)

Farklı tarama mekanizmaları kullanarak özgün zemin ölçüm modelleri oluşturulur. Tarama mekanizmaları, tek bir lazer ışını kullanarak nesnenin yüzeyinde hareket ederek yoğun veri örnekleme işlemi gerçekleştirir. Şekil 2.8a’da tipik bir hava LiDAR sistemi ve Şekil 2.8b’de farklı lazer tarama mekanizmaları ile oluşturdukları desenler şematik olarak gösterilmektedir.



Şekil 2.8. a) Tipik bir hava LiDAR sistemi ve b) çeşitli lazer tarama mekanizmaları ile ortaya çıkan zemin modellerinin şematik gösterimi (Vosselman ve Maas, 2010; Dong ve Chen, 2017; Guo ve diğ., 2023)

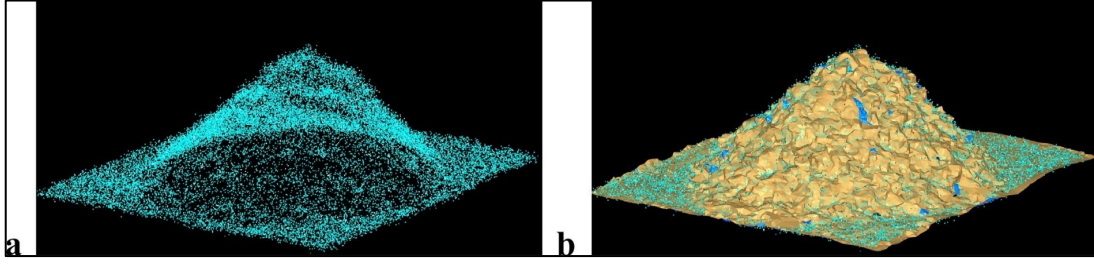
Her tarama modu için nokta yoğunluğu farklıdır ve bu, veri toplanmamış boş alanları veya üst üste gelen verileri de içerebilir. Bazı temel tarama mekanizmalarının ayırt edilebilir özellikleri şöyle sıralanabilir (Vosselman ve Maas, 2010; Shan ve Toth, 2012; Polat ve Uysal, 2016; Dong ve Chen, 2017; Guo ve diğ., 2023):

- İki ayna kullanarak yapılan tarama: İki ayna dik açılı olarak monte edilip, lazer ışını nesnenin yüzeyi üzerinde taranır. Bu, tipik olarak pencere gibi bir görüş alanına sahip kara tabanlı tarama sistemlerinde kullanılır.
- Tek yönde tarama ve döner mekanik aşama: Lazer ışını tek yönde taranır ve cihaz montajı döner bir mekanik aşama ile döndürülür. Genellikle panoramik veya yarımküre şeklinde görüş alanına sahip kara tabanlı tarama sistemlerinde kullanılır.

- Hareketli platformlarla tarama: Lazer ışını tek yönde taranır ve bir uçak veya araç üzerine monte edilir. İkinci tarama yönü, platformun hareketi ile sağlanır ve GNSS/IMU birimi platformun konumunu ve yönelimini ölçer.
- Çok yönlü tarama: Üçgenleme (triangulation) temelli tarama sistemlerinde, tek bir nokta yerine bir çizgi oluşturarak tarama işlemi gerçekleştirilir. Bu durumda, tarama tek yönde sınırlıdır. Birden fazla çizgi veya şerit deseni kullanarak, tarama gerektirmeyen tam alanlı teknikler uygulanabilir.
- Flaş LiDAR teknikleri: CMOS teknolojisi ile geliştirilen bu tekniklerde, lazer ışını taramaya gerek kalmadan zamanında uçuş verilerini algılayabilen foto algılayıcılarla donatılmış bir array (dizi) kullanılır.
- Salınlı ayna tekniği: Bu yöntemde, lazer darbesi yüzey üzerinde zigzag desen oluşturacak şekilde bir ayna kullanılır. Bu teknik, ticari hava tabanlı sistemlerde yaygın olarak kullanılır. Tek bir ayna veya çift salınlı düz ayna kullanarak, Z şeklinde veya benzer sinüzoidal desenlerle yüzey üzerinde noktalar ölçülür.
- Paralel çizgi deseni tarama: Sürekli dönen optik bir çokgen kullanarak, paralel çizgiler şeklinde ölçülen noktaların oluşturulduğu tarama yöntemidir.
- Elips şeklinde tarama: Eğik dönen ayna veya prizma kullanarak, yüzey üzerinde ölçüm yapılan eliptik tarama desenleri oluşturulur.

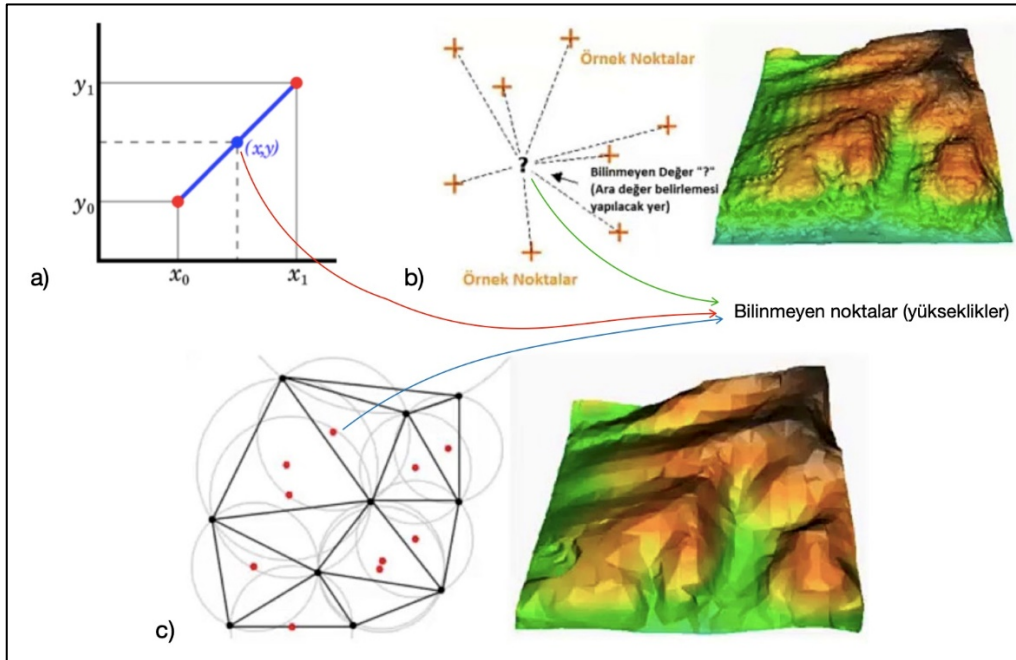
### 2.3.5. LiDAR Verilerinin İşlenmesi ve Kullanımı

LiDAR sistemleri dünyanın yüzey profilini saniyede 150.000 atımdan daha fazla göndererek hızlıca ölçebilir. Sonuçta, yüksek doğrulukta coğrafi yer tanımlama yükseklik noktaları ağı elde edilir (Şekil 2.9a). Bu ağ sıklıkla bir nokta bulutu olarak isimlendirilir. Her nokta için x, y koordinatları ve z değerleri elde edilir ve elde edilen bu noktalar kullanılarak dünya yüzeyinin ve özelliklerinin üç boyutlu yüzey gösterimi oluşturulur (Şekil 2.9b) (Carter ve diğ., 2012). Oluşturulan bu gösterim bilgisayar ortamında 3B görselleştirme yazılımları kullanılarak sayısal yüzey veya yükseklik modeli elde edilerek topoğrafik haritalama uygulamaları için 3B harita haline getirilir (Dutton, 2015). Havadan topoğrafik LiDAR sistemleri, büyük alanlar için sayısal yükseklik modelleri (SYM) üretmekte kullanılan en yaygın uzaktan algılama sistemleridir. Havadan LiDAR verileri, hedeflenen alanların üzerinde uçan bir uçağa veya helikoptere eklenmiş bir sistemden elde edilir.



Şekil 2.9. a) LiDAR nokta bulutu ve b) LiDAR yüzey üretimi (Sofonia ve diğ., 2019)

Uçaklar ve helikopterler geniş, sürekli alanlar üzerinde LiDAR verileri elde etmek için kullanılan en yaygın ve maliyetli platformlardır. Daha küçük alanlar için ya da daha yüksek yoğunlukta bir veriye ihtiyaç duyulduğunda, LiDAR sistemleri helikopterlerde, yer-temelli (ya da su temelli) hareketsiz ve gezgin (mobil) platformlarda kullanılabilir (Carter ve diğ., 2012; Shan ve Toth, 2012; Toth ve Józków, 2016). Yüksek irtifalı platformlarla haritalama işlemlerinde LiDAR verilerinde noktalar arası mesafeler birkaç metreden başlayarak 1 km'lere kadar artar. Bu durumda yazılımlara görev yüklenerek bilinen iki noktadan üçüncü bir nokta çıkarımı (doğrusal interpolasyon yöntemi) yapılır (Şekil 2.10a ve 2.10b). Oluşturulan noktalardan tekrar üç nokta belirlenerek dar açılı üçgenler elde edilmektedir. Yazılım ile üçgenlerle küçük üç boyutlu yapılar oluşturularak haritalama tamamlanır (Şekil 2.10c).



Şekil 2.10. İnterpolasyon yöntemleri: a) doğrusal interpolasyon, b) ters ağırlıklı mesafe interpolasyon ve c) üçgensel interpolasyon (Bhattacharjee ve diğ., 2019)

## 2.4. LiDAR ve Web Teknolojileri

LiDAR verilerinin doğru ve zamanında elde edilmesinin yanı sıra çeşitli uygulamalar için ilgili LiDAR verilerine uzmanların ve kamuoyunun uzaktan erişim yoluyla kolayca erişilebilir olması ve buna göre aksiyon alınabilmesi de önemlidir (Mao ve Cao, 2019). Bireysel araştırmacıların sahip olduğu birçok çevrimiçi aracın özelliklerinin çeşitliliği ve sınırlamaları, 3B görselleştirmeye izin vermeyebilir. Mevcut araçların dezavantajı, 3B nokta bulutunun yoğunluğu da dikkate alındığında, nokta tabanlı ve üçgen tabanlı modellerin karışımından 3B sahneler oluşturacak kadar esnek olmamasıdır (Sun ve Polys, 2020). İnternet dünyasının geniş kullanılabilirliği göz önüne alındığında, uzaktan algılama verilerini tarayıcılar aracılığıyla iletmek iyi bir seçimdir (Mao ve Cao, 2019). Ayrıca HTML5 teknolojisi ve bulut sistemlerindeki gelişmeler Web tabanlı 3B görselleştirmeyi mümkün kılmıştır. LiDAR verilerinin kullanıldığı çeşitli uygulamalarda (ormancılık, çevre vb.) doğru jeo-uzamsal bilgiler kullanarak simülasyonların geliştirilmesi gerekmektedir. Geliştirilen yüksek çözünürlüklü simülasyonlar, bu çeşitli alanlar için bir temel platform sağlayabilen ve paylaşılabilen gerçek zamanlı bir 3B simülasyon altyapısına ihtiyaç duyar. Bu verilerin 3 boyutlu ortamlarda kullanımı platform bağımsız web tabanlı bir altyapının sağlanması ile mümkündür. Bu, genişletilebilir 3D (eXtensible 3D: X3D) standardı kullanılarak elde edilebilir (Yoo ve Brutzman, 2009). 3B veriler, X3D öğelerinin herhangi bir HTML5 DOM'un (Document Object Model: Belge Nesnesi Modeli) bir parçası olarak dahil edilmesini sağlayan X3DOM (X3D+DOM: HTML belgelerinin içeriğiyle ilişkili hiyerarşik temsiller ve etkileşim kavramlarını açıklayan DOM) ile görselleştirilebilir. X3DOM, genişletilebilir 3D (X3D) standardı üzerine inşa edilmiş WebGL tabanlı bir kitaplıktır ve kullanıcıların çok az bilgisayar grafiği bilgisi ile 3B sahneler oluşturmaya olanak tanır (Mao ve Cao, 2019; Sun ve Polys, 2020).

## 2.5. Web 3D (X3D)

X3D (Extensible 3D) bir XML (Genişletilebilir İşaretleme Dili: EXtensible Markup Language) tabanlı 3B dosya formatıdır. Geliştirme süreci ilk olarak 1990'larda geliştirilen VRML (Virtual Reality Modeling Language) adlı bir 3D dosya formatının geliştirilmesiyle başlamıştır. VRML, web tabanlı 3B grafiklerin oluşturulması için bir standart oluşturmayı amaçlıyordu. VRML, birkaç yıl boyunca geliştirildi ve çeşitli

sürümleri yayınlandı. Ancak, VRML'nin kullanımı sınırlı kaldı ve beklenen popülerliği kazanamadı (Brutzman ve Daly, 2007; Behr ve diğ., 2009). Bu nedenle, VRML'nin geliştiricileri daha ileri bir dosya formatı oluşturma kararı aldılar ve 1998 yılında resmi olarak X3D adını taşıyan yeni bir dosya formatını duyurdular (URL-1).

X3D, bilgisayar grafikleri ve 3B modelleme için kullanılan bir açık standarttır ve 3B grafik uygulamalarının geliştirilmesi için birçok araç ve kütüphane tarafından desteklenmektedir (Brutzman ve Daly, 2007; Yoo ve Brutzman, 2009; Plesch ve McCann, 2015). X3D, XML tabanlı olduğundan dolayı birçok platformda çalışabilen, açık kaynaklı, ölçeklenebilir, esnek ve özelleştirilebilir bir yapıya sahip dosya formatıdır. X3D dosyaları, metin tabanlı olduğu için kolayca okunabilir ve düzenlenebilir. Ayrıca, zengin özellik seti sayesinde 3B modellemeye ek olarak, interaktif 3B grafikler, animasyonlar, metinler, grafik arayüzleri ve hatta ses özellikleri de içerebilir yapılar oluşturmak için kullanılabilir (Brutzman ve Daly, 2007).

X3D dosya yapısı, web tabanlı 3B grafikler, sanal gerçeklik, artırılmış gerçeklik, oyunlar ve benzeri alanlarda kullanılmaktadır. X3D, web sayfalarına gömülebilir ve tarayıcıda doğrudan görüntülenebilir. Ayrıca, X3D birçok 3B yazılım paketi tarafından desteklenmektedir ve diğer 3B dosya formatlarına da dönüştürülebilir. Açık kaynaklı bir format olması nedeniyle X3D, geliştiriciler tarafından sürekli olarak güncellenir ve geliştirilir.

X3D, 3B sahneleri ve nesneleri arasında iletişim kurmak ve göstermek için ISO onaylı, telifsiz dosya formatı ve çalışma mimarisine sahiptir. X3D, geniş bir alan dizisini ve kullanıcı senaryolarını desteklemek için açık mimaride, birden fazla uygulamada gerçek zamanlı 3B sahnelerin elde edilmesi, saklanması ve oynatılması için bir sistem sağlar. X3D tamamen 3 boyutlu verileri temsil eder. X3D, mühendislik ve bilimsel görselleştirme, CAD ve mimari, coğrafi uzaysal (mekânsal), insan animasyonu, 3B baskı ve 3B Tarama, artırılmış gerçeklik (AR / MR / VR) gibi alanlarda kullanılmak üzere uyarlanabilecek zengin bir özelliklere sahiptir. Açık bir standart olarak X3D birçok platformda çalışabilir, ancak daha önemlisi, ek veya özel uygulamalar gerektirmeden çoğu web tarayıcısında 3B modeller oluşturabilir (Brutzman ve Daly, 2007; URL-1).

X3D, 3B grafiklerin oluşturulması ve paylaşılması için bir dosya formatı olarak kullanıldığından, geniş bir kullanım alanına sahiptir. Aşağıda X3D'nin kullanım alanlarına ilişkin birkaç örnek verilmiştir (Behr ve diğ., 2009; URL-1):

- Sanal Gerçeklik (VR): X3D, sanal gerçeklik uygulamaları için tercih edilen bir dosya formatıdır. X3D, sanal ortamların oluşturulması için gerekli olan nesne tanımları, malzemeler, ışıklandırma ve kamera ayarlarını içerir.
- Eğitim ve Öğretim: X3D, öğrenme materyallerinin oluşturulması için kullanılabilir. Örneğin, sanal laboratuvarlar veya makine parçalarının 3B modelleri oluşturulabilir ve bu modeller üzerinde eğitim materyalleri hazırlanabilir.
- Görselleştirme ve Simülasyon: X3D, görselleştirme ve simülasyon alanında kullanılan bir dosya formatıdır. Örneğin, bir fabrikadaki proseslerin görselleştirilmesi veya bir uçak simülatöründe kullanılacak 3B modellerin oluşturulması için kullanılabilir.
- Oyun Geliştirme: X3D, oyun geliştiricileri tarafından tercih edilen bir dosya formatıdır. 3B karakter modelleri, çevre nesneleri, animasyonlar ve diğer grafiklerin oluşturulması için kullanılabilir.
- Medikal Uygulamalar: X3D, medikal uygulamalarda da kullanılabilmektedir. Örneğin, bir ameliyat öncesinde dokuların 3B modelleri oluşturulabilir ve bu modeller üzerinde simülasyonlar yapılabilir.
- Mimarlık ve Tasarım: X3D, mimarlık ve tasarım alanında da kullanılmaktadır. Örneğin, bir mimarın tasarladığı bina modeli X3D formatında oluşturulabilir ve bu model üzerinde değişiklikler yapılabilir.

Yukarıda belirtilen örnekler, X3D dosya formatının geniş bir kullanım alanına sahip olduğunu göstermektedir. Bu nedenle, X3D dosya formatının kullanımı hala yaygın olarak devam etmektedir.

X3D, diğer 3B dosya formatlarına göre bazı avantajları şunlardır:

- Açık kaynak kodlu bir formattır, bu nedenle ücretsizdir ve isteyen herkes tarafından kullanılabilir.
- Daha geniş bir işlevselliğe sahiptir ve daha fazla özellik sunar.
- Daha ölçeklenebilir bir formattır, bu nedenle büyük projelerde kullanımı kolaydır.
- İnternet ve web tarayıcılarıyla uyumlu olduğu için, web sayfalarına 3B nesnelerin eklenmesi kolaydır.

X3D dosyalarını görüntülemek ve düzenlemek için farklı özelliklere sahip, kullanıcının ihtiyaçlarına göre seçim yapılabilen çeşitli araçlar mevcuttur. Bu araçlar, X3D-Edit, Xj3D, Flux Studio, FreeWRL, InstantReality, Autodesk 3ds Max, Blender ve Unity olarak belirtilmektedir (Brutzman ve Daly, 2007).



### 3. YÖNTEM: LiDAR VE HARİTALAMA

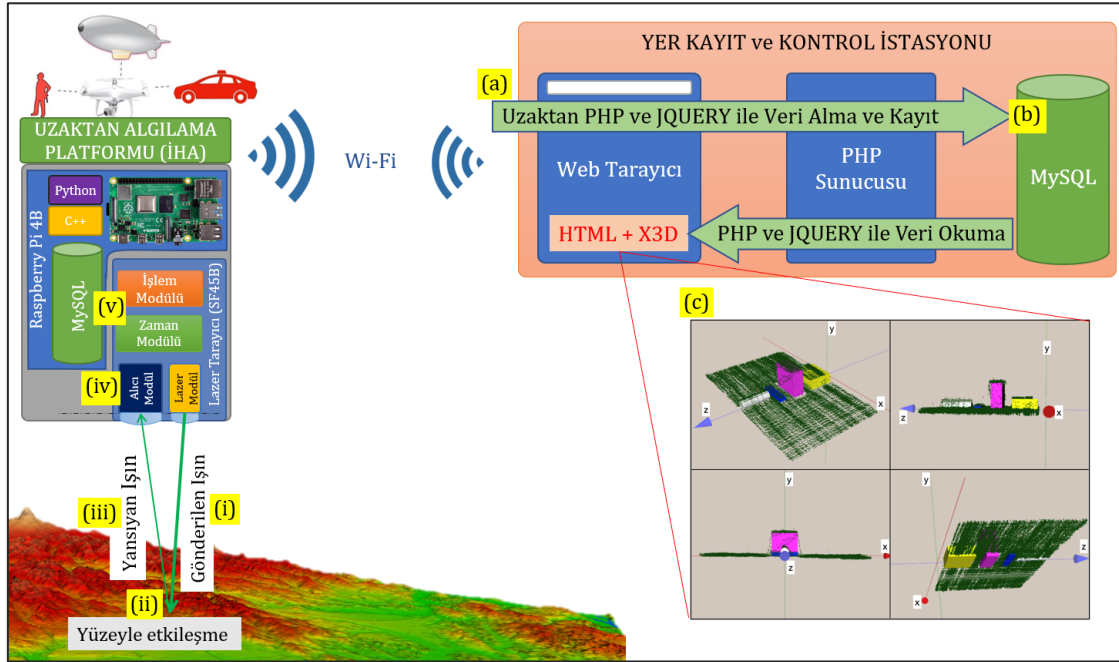
Bazı durumlarda LiDAR verilerinin doğru ve zamanında kullanılabilirliği hayati önem taşır. Yaşanan/yaşanacak olan afet anı ve sonrası için uzun süren LiDAR veri işleme süreçleri acil durum müdahalelerinde önemli bir sorun olmaktadır. Örneğin depremin hemen sonrası, sınırlı ve kullanılabilir yardım kaynaklarının (arama kurtarma ekipleri, sağlık hizmetleri, ekipmanları vb.) en uygun kullanımı için hızlı ve güvenilir bir şekilde 3B hasar değerlendirmesinin yapılması önemli hayati sonuçlar doğurabilir (He ve diğ., 2016). LiDAR verileri işleme süreçlerinin acil durumlardaki hayati önemine uçuşların sistematik olmayışı, düzenli yörünge belirleme ve uçuş planlama gibi etkenlerde eklendiğinde sorun daha da büyümektedir. Ayrıca LiDAR verisi elde etme anında tarama yapılan bölgede çeşitli koşullardan dolayı veri alınamamış ve/veya eksik veri alınmış olması durumlarıyla karşılaşılabilir. Bu durumun tespiti ancak veri işleme süreçlerinde ortaya çıkacağından başta acil durumlarda olmak üzere çevre değişimlerinin izlenmesinde oldukça büyük zaman, enerji ve maliyet kaybına yol açarak sorunların artarak devam etmesine sebep olabilir. Genel olarak açıklanan sebeplerden dolayı LiDAR verilerin anlık görselleştirilememesi ele alınması gereken önemli bir sorun olmaktadır.

Bu amaçla alçak irtifalı LiDAR (İHA-LiDAR) sistemlerinin uçuş öncesi (uçuş planlaması, otopilot sistemleri, düzenli yörünge belirleme) ve uçuş sonrası süreçlerinden (veri işleme) kaynaklanan sorunları ortadan kaldırmanın yanı sıra afet durumlarında rahatlıkla kullanılabilecek anlık 3 boyutlu nokta bulutu üretimi sağlayan web tabanlı etkin bir yöntem ortaya konuldu. Bu tez çalışmasında, özel durumda İHA-LiDAR, genel durumda ise Platformdan Bağımsız Web Tabanlı Gerçek Zamanlı LiDAR Haritalama sistemi tasarlandı ve gerçekleştirildi.

Gerçek zamanlı 3B nokta bulutu elde etme sürecinde ilk olarak anlık (canlı) veri akışı sağlayacak lazer tarama sistemine ihtiyaç duyuldu. Bu ihtiyacı karşılamak için taşıma platformundan (uzaktan algılama platformu) bağımsız çalışabilen bir alçak irtifa İHA-LiDAR sistemi tasarlandı. Tasarlanan Platformdan Bağımsız Web Tabanlı Gerçek Zamanlı LiDAR Haritalama Sisteminin gerçekleştirilmesi için farklı platformlara uygun üç aşamalı deneysel sistemler geliştirildi. Her aşama için taşıma platformu ve platforma uygun konum belirleme ekipmanı değiştirilebilen Platformdan Bağımsız Web Tabanlı Gerçek Zamanlı LiDAR Haritalama Sisteminin yapısı Şekil 3.1’de şematik olarak



veri tabanına anlık olarak kayıt edilir, (c) kısa sürede ve sürekli alınan veriler aynı web arayüzünde HTML + X3D etiketleri ile görselleştirilerek kullanıcıya sunulur.



Şekil 3.2. Geliştirilen sistemin temel yapısı: Uzaktan Algılama Platformundan alınan verilerin Yer Kontrol ve Kayıt İstasyonu aktarma ve görselleştirme süreçleri

Platformdan bağımsız olarak tasarlanan bu sistemin temeli olan veri elde etme, aktarma ve görselleştirme süreçleri “Lazer Tarayıcı ve Kayıt Ortamı” ile “Web Görselleştirme” başlıkları ile irdelendi. Bundan sonraki bölümlerde bu yöntemler kullanılarak farklı platformlar için gerçekleştirilen uygulamalar sunuldu.

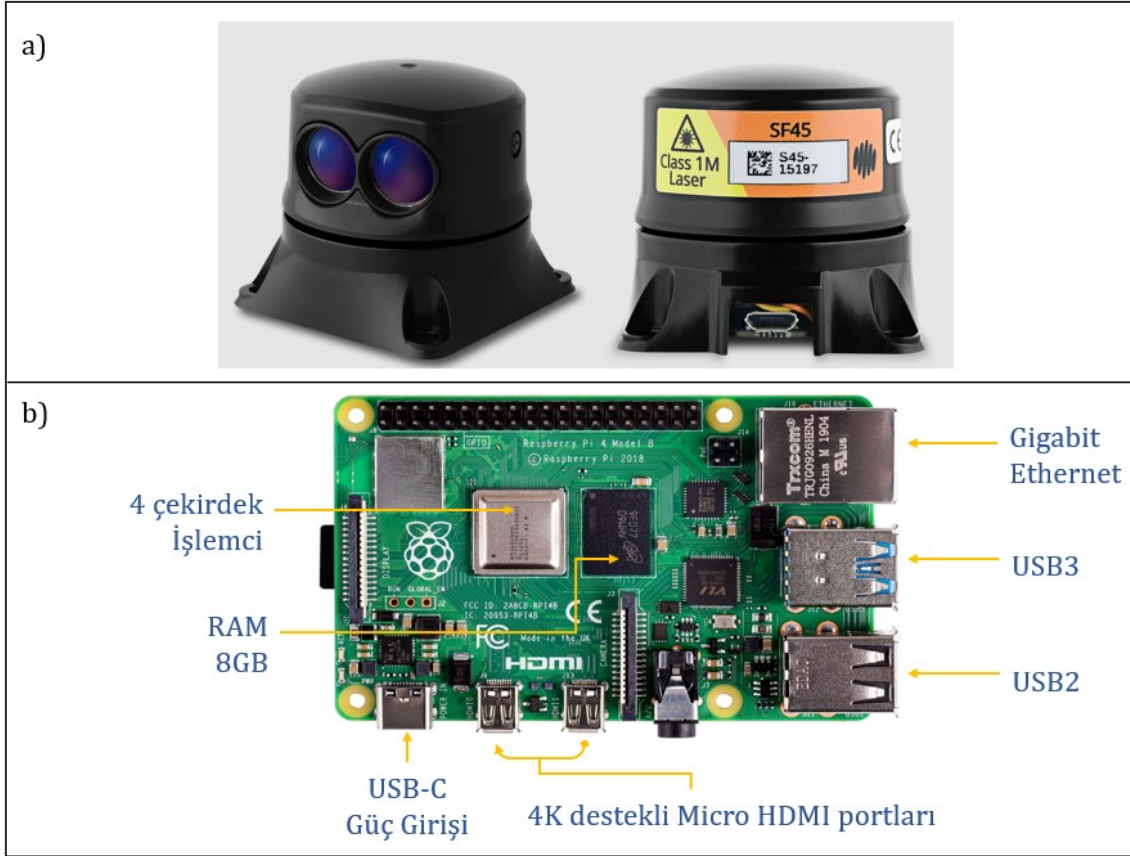
### 3.1. Lazer Tarayıcı ve Kayıt Ortamı

Bütün deneysel aşamalarda sistemi geliştirmek için kullanılan lazer tarayıcı olarak, laboratuvar ortamları gibi küçük alanlarda da çalışmaya uygun olan ve özellikleri Tablo 3.1’de verilen SF45B (micro LiDAR, LightWare Optoelectronics) model lazer tarayıcı seçildi (Şekil 3.3a). Seçilen SF45B lazer tarayıcı, taşıyıcı platformlar üzerine tarama yapılacak alandaki nesneleri tarayacak şekilde yerleştirildi. Lazer tarayıcının görüş alanı (FOV: Field of View) daha ayrıntılı veriler elde etmek için 60° olarak ayarlandı. SF45B model lazer tarayıcı 1 cm doğrusal çözünürlüğe,  $\pm 10$  cm hassasiyete ve 0.2° den düşük açısal çözünürlüğe sahiptir. Ayrıca tarayıcı 340° tarama açısında ve 50 m’ye kadar ölçüm mesafesinde saniyede 5000 okuma yapma kabiliyetindedir. Yine bütün aşamalarda, 64

bit mimariye sahip Broadcom BCM2711-Dört çekirdekli Cortex-A72 (ARM v8) işlemci, 8 GB LPDDR4-3200 RAM ve 64 GB veri depolama özelliğine sahip olan Raspberry Pi 4B (URL-2) mikro bilgisayar kullanıldı (Şekil 3.3b). Tüm sensörlerden gelen veriler Raspberry Pi 4B üzerine kayıt edilerek anlık ve güvenli bir şekilde veri paylaşımı sağlandı.

Tablo 3.1. SF45B lazer tarayıcısının özellikleri (URL-3)

| Performans Verileri           |                                                 |
|-------------------------------|-------------------------------------------------|
| <b>Ölçüm Mesafesi:</b>        | 0.2 - 50 m (gün ışığı koşullarında beyaz duvar) |
| <b>Doğrusal Çözünürlük:</b>   | 1 cm                                            |
| <b>Açısal Çözünürlük:</b>     | < 0.2 derece                                    |
| <b>Güncelleme Oranı:</b>      | Saniyede 5000 okuma ve saniyede 5 tarama.       |
| <b>Hassasiyet:</b>            | ±10 cm                                          |
| Bağlantılar                   |                                                 |
| <b>Güç Kaynağı Gerilimi:</b>  | 4.5 V ... 5.5 V                                 |
| <b>Güç Kaynağı Akımı:</b>     | 300 mA (özgün)                                  |
| <b>Çıkışlar ve Arayüzler:</b> | Seri ve I2C bağlantı (3,3 V TTL), Mikro USB     |
| <b>Entegrasyon:</b>           | ArduPilot, ROS, Arduino, Raspberry Pi           |
| <b>Yazılım:</b>               | LightWare Studio (Seçenek)                      |
| Mekanik Özellikler            |                                                 |
| <b>Boyutlar:</b>              | 51 mm x 48 mm x 44 mm                           |
| <b>Ağırlık:</b>               | 59 gr (kablolar hariç)                          |
| Optik Özellikler              |                                                 |
| <b>Lazer Güvenliği:</b>       | Class 1M                                        |
| <b>Optik Açıklık:</b>         | 28 mm x 15 mm                                   |
| <b>Işın Sapması:</b>          | < 0.5 derece                                    |
| <b>Lazer Dalga Boyu:</b>      | 905 nm                                          |
| <b>Atım Genişliği:</b>        | 16 ns                                           |
| <b>Atım Frekansı:</b>         | 20 kHz                                          |
| <b>Ortalama Güç:</b>          | < 2.5 mW                                        |
| Çevresel Çalışma Şartları     |                                                 |
| <b>Çalışma Sıcaklığı:</b>     | -10 ... +50 °C                                  |
| <b>Onaylar:</b>               | FDA: 1710193-000 (2020/09)                      |



Şekil 3.3. a) SF45B model lazer tarayıcı ve b) Raspberry Pi 4B

### 3.2. Web Görselleştirme (X3D)

Önerilen Platformdan Bağımsız Web Tabanlı Gerçek Zamanlı LiDAR Haritalama Sistemi kapsamında, hem laboratuvar ortamında hem de gerçek ortamda gerçekleştirilen LiDAR sisteminden elde edilen veriler gerçek zamanlı işlendi. Elde edilen veriler platformdan bağımsız ve web tarayıcı üzerinden çalışabilen X3D (Extensible 3D) dosya biçimi ile PHP programlama dili kullanılarak anlık 3B nokta bulutu olarak görselleştirildi. Web teknolojisinin gelişimi ile sürekli yenilenebilir/geliştirilebilir özellikte olan web tabanlı bir arayüz ile anlık görselleştirme sağlayan bu sistemde elde edilen veriler aynı zamanda veri tabanına (PostGIS/PostgreSQL veya MySQL) kayıt edilerek depolanabilmektedir. X3D grafik kütüphanelerinin gelişimi hızlı ve kararlı bir şekilde sürdürülerek daha fazla platform üzerinde kullanımı arttırılmaktadır (URL-4). Bazı web temelli (HTML5) çalışmalarda X3D dosya biçimli coğrafi görselleştirmeler yapılmış olsa da ilgili sistemlerde insanlı/insansız hava araçları vasıtasıyla daha önceden elde edilmiş LiDAR verileri kullanılmıştır (J.-S. Kim ve diğ., 2015; Mao ve Cao, 2019). Bu çalışma kapsamında, platformdan bağımsız olarak tasarlanan sistem ile anlık (gerçek zamanlı)

olarak elde edilen LiDAR verileri, X3D dosya biçimi kullanılarak geliştirilen bir web tabanlı arayüz üzerinden platformdan bağımsız (Windows, MacOS, Linux, vb.) olarak kullanıma sunuldu.

### **3.2.1. X3D Dosya Formatı**

X3D dosya formatı, bir XML tabanlı dosya formatıdır. Bu nedenle, X3D dosyaları insanlar tarafından kolayca okunabilir ve anlaşılabilir. X3D dosyaları, 3B modelleri, malzemeleri, ışıklandırmayı, animasyonları ve diğer grafik öğelerini içerebilir. X3D dosyaları, genellikle ".x3d" veya ".x3dz" uzantısı ile kaydedilir (Brutzman ve Daly, 2007; Yoo ve Brutzman, 2009; URL-1).

X3D dosya formatı, üç temel bölümden oluşur: sahne grafiği, düğüm tanımları ve prototipler. Sahne grafiği, dosyanın genel yapısını belirleyen bölümdür ve tüm düğümleri ve prototipleri içerir. Düğüm tanımları, sahne grafiğinde kullanılan tüm nesnelerin ve özelliklerin ayrıntılı tanımlamalarını içerir. Prototipler, tekrar eden nesneler için önceden tanımlanmış şablonlardır ve daha sonra sahne grafiğinde kullanılabilirler.

X3D dosyaları, diğer 3B dosya formatlarından farklı olarak hem statik hem de dinamik grafik öğelerini içerebilir. X3D dosyaları, animasyonları ve interaktif özellikleri destekleyerek, kullanıcılara özelleştirilebilir bir deneyim sunar. Ayrıca, X3D dosyaları, 3B yazılım paketlerinden veya farklı kaynaklardan da içe aktarılabilir ve işlenebilir. Bu dosya formatının başlıca özellikleri şunlardır: platformdan bağımsız olması, web tarayıcı üzerinden çalışabilmesi, XML altyapısını kullanarak hiyerarşik modellemeye olanak sağlaması ve web üzerinden 3B etkileşimli dünyalar oluşturabilen avantajlı bir açık kaynak kod sistemi olması. Bu özellikler, kullanıcıların esneklik ve kolaylık sağlayarak dosyaları farklı platformlarda paylaşabilmesini, web üzerinden erişebilmesini ve zengin 3B deneyimler oluşturabilmesini mümkün kılar.

Sonuç olarak, X3D dosya formatı, XML tabanlı, esnek, ölçeklenebilir ve zengin bir özellik setine sahip bir 3B dosya formatıdır. X3D dosyaları, kullanıcılar tarafından kolayca okunabilir ve düzenlenebilir, ayrıca web tabanlı 3B grafikler, sanal gerçeklik ve artırılmış gerçeklik, oyunlar ve diğer 3B uygulamalar için kullanılabilir.

X3D dosya formatının üç temel bölümü şu şekilde ayrıntılı olarak açıklanabilir (Brutzman ve Daly, 2007; URL-1):

- Sahne Grafiği: Sahne grafiği, X3D dosyasının genel yapısını belirleyen bölümdür ve tüm düğümleri ve prototipleri içerir. Sahne grafiği, “X3D” düğümü ile başlar ve “Scene” düğümü ile biter. Sahne grafiği, aşağıdaki öğeleri içerebilir:
  - i. Background: Sahnenin arka plan rengi ve görünümünü ayarlamak için kullanılır.
  - ii. Navigation Info: Kullanıcının sahne içinde hareket etmesine izin veren ayarlar bulunur.
  - iii. Viewpoints: Sahnenin farklı görünümünü tanımlayan öğelerdir.
  - iv. Lights: Sahneye ışıklandırma sağlamak için kullanılan öğelerdir.
  - v. Cameras: Sahnenin kamera ayarlarını tanımlayan öğelerdir.
  - vi. Geometries: Sahnedeki nesnelerin geometrilerini ve şekillerini tanımlayan öğelerdir.
  - vii. Grouping: Sahnedeki nesneleri gruplandırmak için kullanılan öğelerdir.
- Düğüm Tanımları: Düğüm tanımları, sahne grafiğinde kullanılan tüm nesnelerin ve özelliklerin ayrıntılı tanımlamalarını içerir. Düğüm tanımları, “DEF” ve “USE” anahtar kelimeleri ile tanımlanır. Bu düğümler, daha sonra sahne grafiğindeki diğer düğümler tarafından “USE” anahtar kelimesi ile çağrılabilirler. Düğüm tanımları, aşağıdaki öğeleri içerebilir:
  - i. Transform: Nesnelerin konumunu, rotasyonunu ve ölçeğini tanımlar.
  - ii. Shape: Nesnelerin görünümünü, rengini ve malzemelerini tanımlar.
  - iii. Appearance: Nesnelerin malzeme özelliklerini tanımlar.
  - iv. Material: Nesnelerin yüzey özelliklerini ve rengini tanımlar.
  - v. Texture: Nesnelerin üzerine uygulanacak dokuları tanımlar.
  - vi. Text: 2D metin nesnelerinin özelliklerini tanımlar.
- Prototipler: Prototipler, X3D dosyasında kullanılabilecek özelleştirilmiş düğüm tanımlarıdır. Bu, birden fazla nesne için aynı düğüm tanımını kullanmak istediğimizde faydalıdır. Prototipler, “PROTO” anahtar kelimesi ile tanımlanır ve daha sonra sahne grafiğinde “ProtoInstance” düğümü ile çağrılabilir. Prototipler, aşağıdaki öğeleri içerebilir:
  - i. field: Prototipin özelleştirilebilir özelliklerini tanımlar.
  - ii. IS: Prototipin, başka bir prototip veya nesne tarafından kullanılmasına izin verir.

Bu temel bölümler, X3D dosya formatının yapısını oluşturur ve her biri sahne grafiği oluşturma, nesne tanımlama ve özelleştirme işlemlerini mümkün kılar.

### 3.2.2. X3D Dosya Formatı Kullanımı

X3D dosyaları, web sayfalarına gömülebilir ve tarayıcıda görüntülenebilir. Bu, web sayfalarına interaktif 3B sahneleri eklemenin popüler bir yoludur. X3D dosyalarının web sayfalarına yerleştirilmesi ve tarayıcıda görüntülenmesi aşağıdaki gibi olur (Brutzman ve Daly, 2007; URL-1):

1. X3D dosyasını web sunucusuna yükleyerek: İlk adım, X3D dosyasını web sunucusuna yüklemektir. Bu, dosyayı tarayıcının erişebileceği bir yere yerleştirir. Birçok web sunucusu, X3D dosyalarının yüklenmesine izin verir.

2. X3D dosyasını web sayfasına ekleyerek: X3D dosyasını web sayfasına eklemek için HTML kodu kullanılabilir. X3D dosyasını göstermek için <embed> veya <object> etiketleri kullanılabilir. Örneğin:

```
<embed      src="model.x3d"      type="model/x3d+xml"      width="600"
height="400"></embed>
```

Bu kod, “model.x3d” adlı X3D dosyasını gösterir ve genişliği 600 piksel, yüksekliği 400 piksel olarak ayarlar. “type” özneliği, tarayıcının X3D dosyasını doğru şekilde yüklemesi için dosya türünü belirtir. X3D dosyalarını web sayfalarına gömmek için HTML kodu kullanılabilir. Şekil 3.4’te örnek kod, X3D dosyasını web sayfasına gömmek için basit bir HTML kodudur. Bu kod, “X3D Örneği” adlı bir başlık, bir metin paragrafı ve bir küp şeklini içeren bir X3D sahnesi oluşturur. <x3d> etiketi, X3D sahnesini içeren temel etikettir ve “width” ve “height” özellikleri ile boyutlandırılabilir. X3D sahnesi, <scene> etiketi içinde tanımlanır ve burada küp şekli, <shape> etiketi içinde <appearance> ve <material> etiketleriyle birlikte tanımlanır.

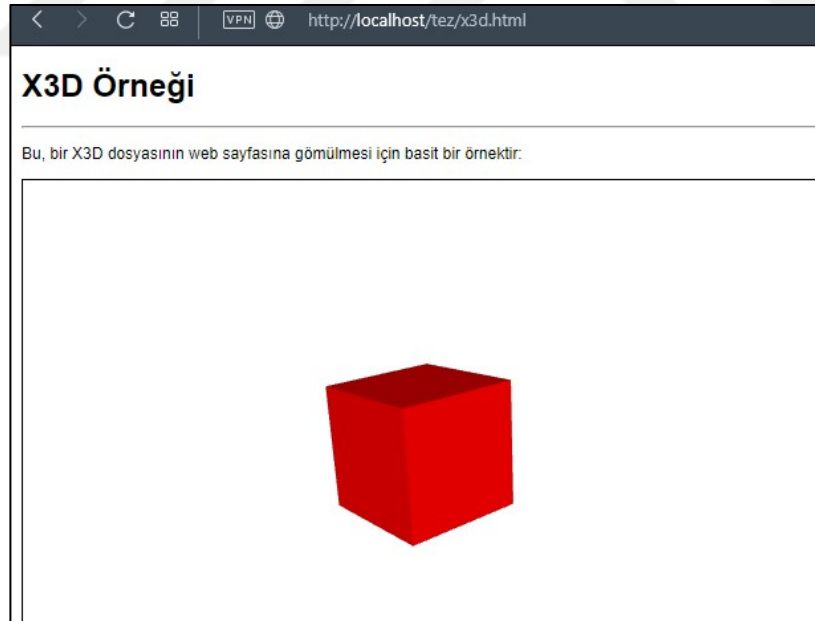
3. Tarayıcıda X3D dosyasını görüntüleme: X3D dosyası web sayfasına eklenince, tarayıcıda görüntülenebilir (Şekil 3.5). X3D dosyaları, özellikle X3D görüntüleyicisi olan tarayıcılarla uyumlu hale getirilmiştir. Google Chrome, Microsoft Edge, Mozilla Firefox, Opera ve Safari gibi popüler tarayıcılar, X3D dosyalarını destekler.

4. X3D dosyasını etkileşimli hale getirilerek: X3D dosyası, etkileşimli hale getirilebilir. Bu, kullanıcıların X3D sahnesindeki nesnelerle etkileşim kurmasına olanak tanır.

Örneğin, kullanıcıların bir nesneyi tıklaması veya hareket ettirmesi gibi etkileşimler gerçekleştirebilir. Bu, X3D dosyasında yazılım geliştirme becerileri gerektirebilir.

```
1 <!DOCTYPE html>
2 <html>
3 <meta charset="utf-8">
4 <head>
5   <title>X3D Örneği</title>
6   <script type="text/javascript" src="x3dom/x3dom-full.js"></script>
7   <link rel="stylesheet" type="text/css" href="x3dom/x3dom.css"></link>
8 </head>
9 <body>
10  <h1>X3D Örneği</h1>
11  <hr>
12  <p>Bu, bir X3D dosyasının web sayfasına gömülmesi için basit bir örnektir:</p>
13  <x3d width="600px" height="400px">
14    <scene>
15      <shape>
16        <appearance>
17          <material diffuseColor="1 0 0"></material>
18        </appearance>
19        <box></box>
20      </shape>
21    </scene>
22  </x3d>
23 </body>
24 </html>
```

Şekil 3.4. X3D dosya yapısının HTML etiketleri arasındaki görünümü



Şekil 3.5. X3D dosya yapısının web tarayıcısında görünümü

Sonuç olarak, X3D dosyaları web sayfalarına kolayca gömülebilir ve tarayıcıda görüntülenebilir. Bu, web geliştiricilerin, interaktif 3B sahneleri web sayfalarına eklemelerine olanak tanır.

### 3.2.3. Geliştirilen Tasarımda X3D Dosya Formatının Kullanımı

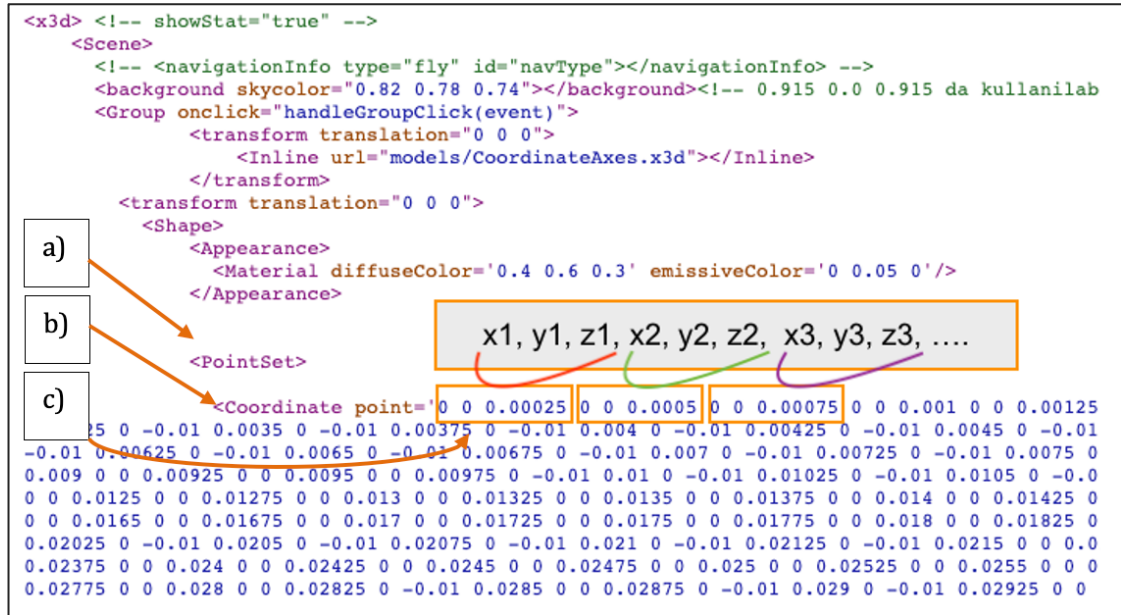
Bütün deneysel aşamalarda web arayüzünde HTML5 etiketleri ile birlikte X3D'nin `<PointSet>` `<PointSet />` etiketi kullanıldı. Bu kullanımdaki amaç bu etiketinde altında çalışan `<Coordinate point="x1, y1, z1, x2, y2, z2, ..., xn, yn, zn" />` etiketi ile uzaydaki her noktanın 3 boyuttaki koordinatlarının sıralı bir şekilde yerleştirmesine olanak sağlamasıdır. Örnek kodlama;

```
<PointSet>

  <Coordinate point="x1, y1, z1, x2, y2, z2, ..., xn, yn, zn" />

</PointSet>
```

şeklindedir. Burada 3B görselleştirmeyi sağlamak için “point” parametresindeki alana veri tabanından tarama anında elde edilen veriler çekildi. Şekil 3.4'te HTML5 ve X3D etiketlerinin sayfa kaynak kodunda görünümü yer almaktadır. Burada `<PointSet>` etiketinin kullanımı (Şekil 3.4a), `<Coordinate>` etiketinin kullanımı (Şekil 3.4b), (x<sub>n</sub>, y<sub>n</sub>) koordinatlarının ve (z<sub>n</sub>) değerlerinin veri tabanından çekilmiş hali (Şekil 3.4c) görülmektedir.



### **3.3. Tasarlanan Sistemde Kullanılan Yazılım ve Bileşenler**

Bu bölümde, tez çalışmasında kullanılan programlama dilleri olan C/C++, Python, PHP, jQuery'nin sürüm bilgileri ile kullanım gerekçeleri hakkında bilgi verildi. Ayrıca verilerin kayıt edildiği MySQL veri tabanı sürüm bilgisi ile Navio2 uçuş kontrol kartı ve Pixhawk Cube Orange+Here3<sup>+</sup> otopilot uçuş kontrol kartının teknik özellikleri hakkında bilgi verildi. İki ayrı uçuş kontrol sisteminin kullanılmasının sebebi geliştirilen sistemin her uçuş sistemine uyarlanabilirliğini göstermek içindir.

#### **3.3.1. C/C++**

Bu tez çalışmasının Simülasyon Platformunda LiDAR Haritalama aşamasında, SF45B lazer tarayıcısının çalıştırılması için üretici firma tarafından sağlanan ve GitHub-LightWare-SF45B-C/C++ web adresinde yayınlanan C/C++ kod parçası kullanıldı. Kullanılan kod parçasında “while” döngüsüne gelen verilerin (mesafe ve açı) veri tabanına kayıt edilmesi için ek kod parçası eklendi. SF45B lazer tarayıcısını çalıştırmak ve verileri MySQL veri tabanına kayıt etmek için geliştirilen bu C/C++ kod parçası, mesafe ve açı bilgisini elde etmede başarılı bir şekilde kullanıldı.

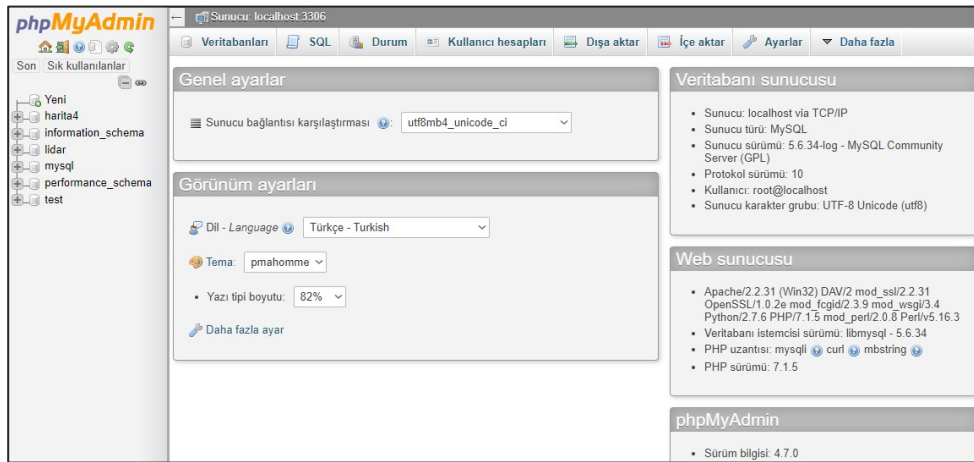
#### **3.3.2. Python**

Python, basit ve anlaşılır sözdizimi ile bilinen bir programlama dilidir. Yüksek seviyeli olması ve geniş bir kütüphane desteğine sahip olması, hızlı prototipleme, veri analizi, yapay zekâ ve makine öğrenmesi gibi alanlarda popüler hale gelmesini sağlamıştır (URL-5).

Bu tez çalışmasının Elle Taşınabilir Platformda LiDAR Haritalama ve İHA Platformunda LiDAR Haritalama aşamalarında, SF45B lazer tarayıcısının çalıştırılması için üretici firma tarafından sağlanan ve GitHub-LightWare-SF45B-Python web adresinde yayınlanan Python kod parçası kullanıldı. Kullanılan kod parçasında “while” döngüsüne gelen verilerin (GNSS, IMU, mesafe, açı) veri tabanına kayıt edilmesi için ek kod parçası eklendi. SF45B lazer tarayıcısı çalıştırılarak ölçülen mesafe ve açı bilgisi ile birlikte GNSS ve IMU'dan elde edilen konum verileri MySQL veri tabanına kayıt etmek için geliştirilen bu Python kod parçası başarılı bir şekilde kullanıldı. Bütün çalışma boyunca Python 3.7+ sürümü kullanıldı.

### 3.3.3. PHP, MySQL ve jQuery

PHP, HTML içine gömülerek kullanılabilen ve dinamik web sayfalarının oluşturulmasını sağlayan sunucu taraflı bir betik/programlama dilidir. Bu özelliğinden dolayı kullanıcılarla etkileşimli web siteleri oluşturulabilir. Veri tabanı işlemleri, POST ve GET işlemleri gibi web uygulamalarında sıklıkla kullanılır. İstemci (web tarayıcı) ile sunucu arasında bilgi alışverişi yapmayı sağlayan POST ve GET, web uygulamalarında kullanılan HTTP yöntemleridir (URL-6). Bu tez çalışmasının her aşamasında geliştirilen web arayüzü, uzak sunucudan (Raspberry Pi 4B) yerel sunucuya veri kopyalama, yerel veri tabanında verilerin anlık ve sürekli web sayfasında gösterilmesi süreçlerinde PHP betik dili, jQuery kütüphanesi ve MySQL veri tabanı kullanıldı. Çalışmada PHP 7.1.5 sürümü ve MySQL 5.6.34 sürümü kullanıldı. MySQL veri tabanı kontrolleri yapılabilmesi için phpMyAdmin (sürüm: 4.7.0) arayüzü kullanıldı (Şekil 3.7). Genel olarak jQuery, web sayfalarına etkileşim ve işlevsellik eklemek için kullanılabilecek güçlü ve çok yönlü bir JavaScript tabanlı bir açık kaynak kütüphanedir. jQuery, HTML belgelerindeki elementleri manipüle etmek, animasyonlar oluşturmak, olayları işlemek, AJAX istekleri yapmak gibi birçok yaygın web geliştirme sürecini kolaylaştırmak için kullanılır. AJAX web uygulamalarında veri alışverişi yapmak için kullanılan bir tekniktir. AJAX (Asynchronous JavaScript and XML), sayfayı yenilemeden sunucuyla arka planda veri alışverişi yapmayı sağlar ve böylece kullanıcı deneyimini geliştirir (URL-7).



Şekil 3.7. PHP, MySQL ve phpMyAdmin sürüm bilgileri

Bu çalışmada, uzak sunucudan yerel sunucuya veri kopyalama ve yerel veri tabanında verilerin anlık ve sürekli web sayfasında gösterilmesi işlemi yapılırken “sayfayı

yenilemeden sunucuyla arka planda veri alışverişi yapmayı” sağlama özelliğinden dolayı jQuery’nin AJAX özelliği kullanıldı (Şekil 3.8).

```
<script type="text/javascript">

$(document).ready(function(){

    var last_id = 0;
    var limit = 100;

    function fetchData() {
        $.ajax({
            url:"veri/verilyerel.php",
            method:"POST",
            data:{last_id:last_id, limit:limit},
            dataType:"json",
            success:function(data){
                if (data.length > 0) {
                    last_id = data[data.length - 1].id;

                    var points = $("#div-to-refresh").attr("point"); // Mevcut "point" parametresinin içeriğini al

                    $.each(data, function(index, element){
                        points += (points == "" ? "" : " ") + element.yazilim_x + " " + element.yazilim_y + " " + element.yazilim_z;
                    });

                    $("#div-to-refresh").attr("point", points); // Güncellenmiş "point" parametresini div elementine ekle
                }
            }
        });
    }

    fetchData(); // sayfa yüklendiğinde ilk veri yükleme işlemi
    setInterval(function(){
        fetchData(); // belirli aralıklarla veri yükleme işlemi
    }, 100);

});

</script>
```

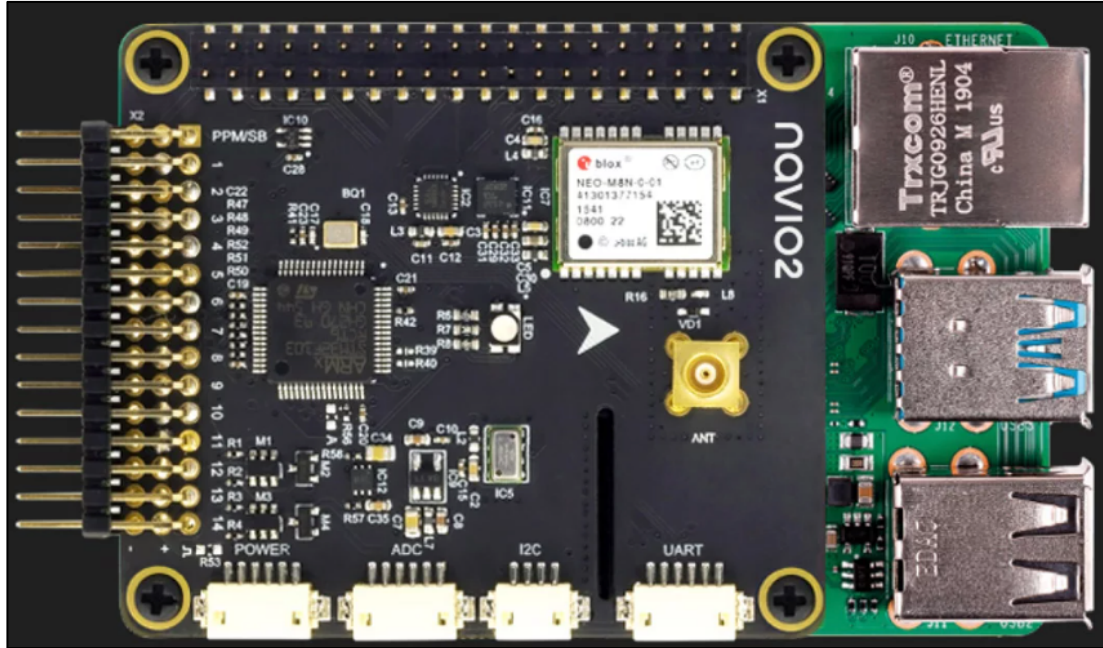
Şekil 3.8. jQuery’nin AJAX özelliği ile verilerin alınmasını gösteren betik

### 3.3.4. Navio2 Uçuş Kontrol Kartı

Bu tez çalışmasının Elle Taşınabilir Platformda LiDAR Haritalama ve İHA Platformunda LiDAR Haritalama aşamalarında, konum bilgisini GNSS ve IMU sensörlerinden elde edebilmek için teknik özellikleri Tablo 3.2’de verilen Raspberry Pi 4B ile tümleşik çalışabilen Navio2 uçuş kontrol kartı kullanıldı (Şekil 3.9). Raspberry Pi tabanlı bir uçuş kontrol kartı olan Navio2, Kuadcopter ve hekzacopter dahil olmak üzere çeşitli insansız hava araçlarında (İHA, dron) kullanılmak üzere tasarlanmıştır. Navio2, ArduPilot yazılımıyla uyumlu olarak çalışır ve kullanıcılara uçuş kontrolü, navigasyon, otonom uçuş ve sensör entegrasyonu gibi bir dizi özellik sunar. Navio2, bir çift IMU, bir GNSS alıcısı ve bir RC I/O yardımcı işlemcisi dahil olmak üzere bir dizi sensör ve denetleyiciye sahiptir. Bu, İHA’ya doğru konum, yön ve hız bilgileri sağlamasına olanak tanır. Navio2 ayrıca otomatik, beni takip et ve rehberli dahil olmak üzere çeşitli uçuş modlarını destekler. ArduPilot, PX4 ve DroneKit dahil olmak üzere çeşitli otomatik pilot yazılımlarıyla da uyumludur.

Tablo 3.2. Navio2 uçuş kontrol kartının özellikleri (URL-8)

| Algılayıcılar                  |                                                        |
|--------------------------------|--------------------------------------------------------|
| <b>IMU (2x):</b>               | MPU9250 9DOF, LSM9DS1 9DOF                             |
| <b>Barometre:</b>              | MS5611                                                 |
| <b>GNSS:</b>                   | U-blox M8N GLONASS/GPS/Beidou                          |
| Bağlantılar                    |                                                        |
| <b>Güç Kaynağı:</b>            | Güç modülü, servo ray, USB                             |
| <b>Güç Kaynağı Besleme:</b>    | 4.75 - 5.25 V                                          |
| <b>Ortalama Akım Tüketimi:</b> | 150 mA                                                 |
| <b>Çıkışlar ve Arayüzler:</b>  | UART, I2C, ADC, 12 PWM servo çıkışı, PPM/S. Bus girişi |
| <b>Entegrasyon:</b>            | ArduPilot, Raspberry Pi                                |
| Mekanik Özellikler             |                                                        |
| <b>Boyutlar:</b>               | 55 mm x 65mm                                           |
| <b>Ağırlık:</b>                | 23 gr                                                  |
| <b>Çalışma Sıcaklığı:</b>      | - 40...+85 °C                                          |



Şekil 3.9. Navio2 uçuş kontrol kartı ve Raspberry Pi 4B entegrasyonu

### 3.3.5. Pixhawk Uçuş Kontrol Kartı

Bu tez çalışmasının Elle Taşınabilir Platformda LiDAR Haritalama ve İHA Platformunda LiDAR Haritalama aşamalarında, ikinci bir uçuş kontrol kartı olan ve teknik özellikleri Tablo 3.3'te verilen Raspberry Pi 4B ile uyumlu çalışabilen Pixhawk Cube Orange+Here3<sup>+</sup> otopilot uçuş kontrol kartı kullanıldı (Şekil 3.10). İki ayrı uçuş kontrol sisteminin kullanılmasının sebebi geliştirilen sistemin her uçuş sistemine uyarlanabilirliğini göstermek içindir. Pixhawk Cube Orange, çeşitli insansız hava araçlarında (İHA, dron) kullanılmak üzere tasarlanmış güçlü ve çok yönlü bir otopilot sistemidir. Yüksek performanslı ARM Cortex-M7 işlemciye sahiptir ve genişletilebilir bir yapı sunar. Birden fazla sensör ve veri bağlantısını destekler. Güvenilir ve hassas uçuş kontrolü sağlar. Here3+ GPS/GNSS alıcısı, İHA'ların güvenli ve güvenilir çalışması için gerekli olan yüksek hassasiyetli konum, hız ve zaman bilgileri sağlar. Pixhawk Cube Orange+Here3<sup>+</sup>, kuadcopter, hexacopter ve oktocopter gibi çok çeşitli İHA platformlarıyla uyumludur. ArduPilot, PX4 ve DroneKit dahil olmak üzere çeşitli otomatik pilot yazılımlarıyla da uyumludur.

Tablo 3.3. Pixhawk Cube Orange+Here3<sup>+</sup> uçuş kontrol kartının özellikleri (URL-9)

| Algılayıcılar                 |                                                                 |
|-------------------------------|-----------------------------------------------------------------|
| <b>IMU (3x):</b>              | IMU1: ICM42688, IMU2: ICM20948, IMU3: ICM20649 (ya da ICM45686) |
| <b>Barometre (2x):</b>        | MS5611                                                          |
| <b>GNSS:</b>                  | GPS L1C/A, GLONASS L1OF, BeiDou B1I                             |
| Bağlantılar                   |                                                                 |
| <b>Güç Kaynağı:</b>           | Güç modülü, servo ray (3,3 V / 5 V), USB                        |
| <b>Güç Besleme:</b>           | 4.1 - 5.7 V, 250 mA                                             |
| <b>Çıkışlar ve Arayüzler:</b> | UART, 2 I2C, ADC, 14 PWM servo çıkışı, 4 Mavlink seri arayüz    |
| <b>Entegrasyon:</b>           | ArduPilot, PX4, Hionos DO-178C ve Raspberry Pi                  |
| Mekanik Özellikler            |                                                                 |
| <b>Boyutlar; Ağırlık:</b>     | 76 mm x 76 mm x 16.6 mm; 73 gr                                  |
| <b>Çalışma Sıcaklığı:</b>     | - 40...+85 °C                                                   |



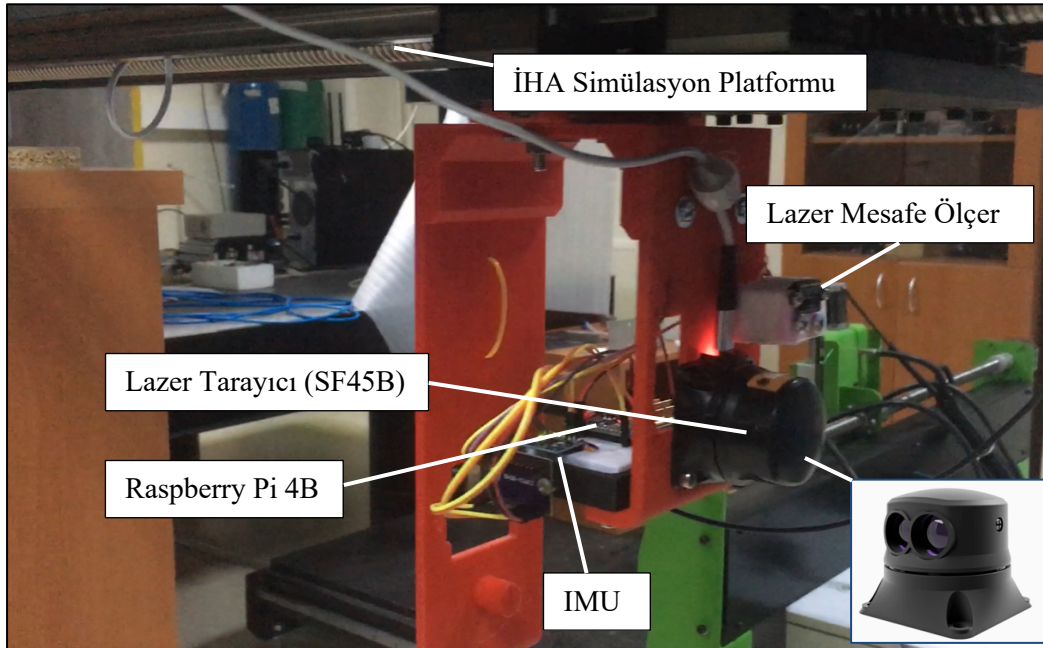
Şekil 3.10. Pixhawk Cube Orange+Here3+ otopilot uçuş kontrol kartı

#### 4. SİMÜLASYON PLATFORMUNDA LİDAR HARİTALAMA

Burada geliştirilen Platformdan Bağımsız Web Tabanlı Gerçek Zamanlı LiDAR Haritalama sistemi gerçek sistemlerde kullanılan tüm sensörlerden gelen verileri test etmek için ilk olarak laboratuvar ortamında simüle edildi. Laboratuvar ortamında simüle edilen bu sistemi, istenilen uzaktan algılama platformuna uyarlanabilecek özelliklere sahiptir ve sınırları genişletilebilir. Bu bölümde laboratuvar ortamında yapılan lazerle tarama deney sistemi ve bileşenleri verilmiştir. Deney sistemi ile elde edilen LiDAR verileri ve oluşturulan gerçek zamanlı 3B haritalama sonuçları sunulmuştur.

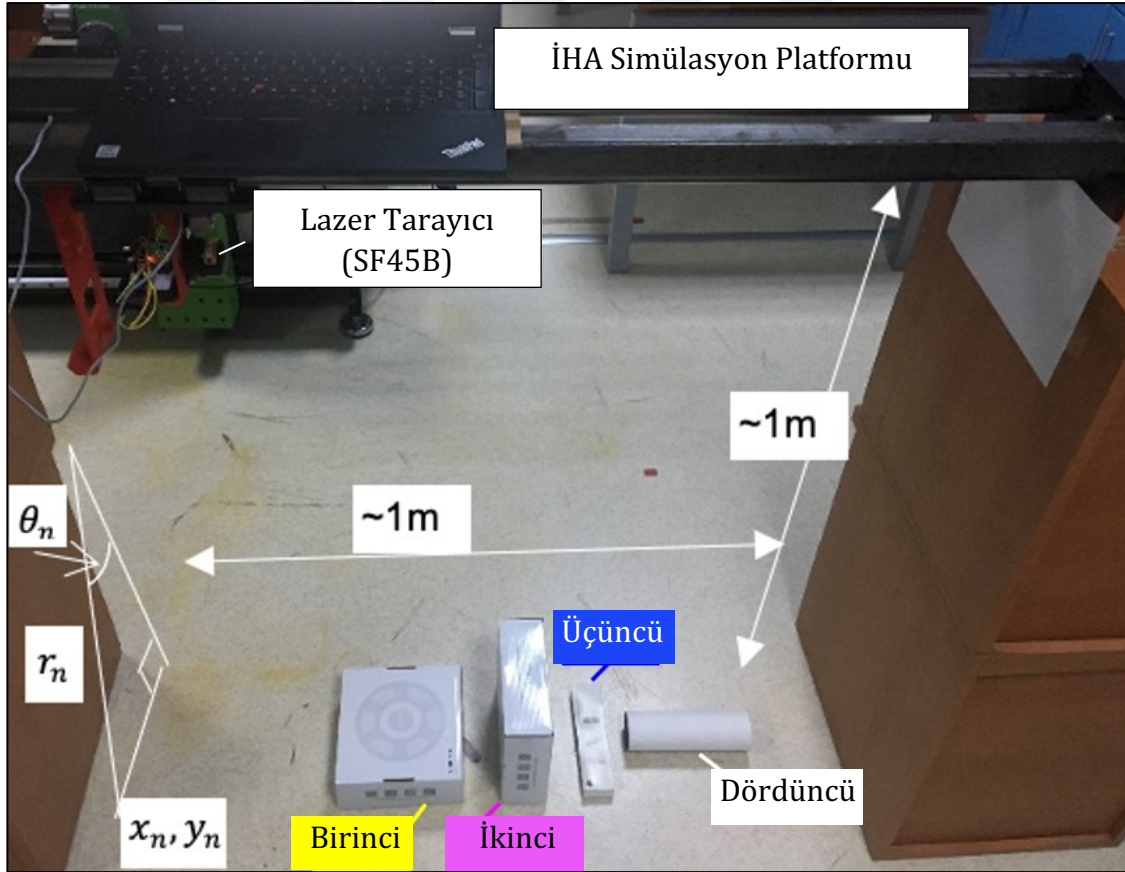
##### 4.1. Deneyel Sistem

Bu tez çalışmasının uygulama aşamasının ilkinde, “Platformdan Bağımsız Web Tabanlı Gerçek Zamanlı LiDAR Haritalama sistemi” yöntemini ortaya koymak amacıyla herhangi bir uçuş platformu için laboratuvar ortamında gerçek ortam bileşenlerine uyarlanabilen bir simülasyon sistemi oluşturuldu (Şekil 4.1). Burada gerçek zamanlı tarama işlemleri için uzaktan algılama platformu olarak sabit yükseklikteki bir kızak üzerinde sabit hızla hareket ettirilen bir platform kullanıldı. Sabit hızla hareket eden platformun ardışık konumlarından yere olan mesafeler bir dizi tarama yapılarak ölçüldü.



Şekil 4.1. Simülasyon sistemi: Uzaktan algılama platformu, tarama sistemi, LMÖ, kayıt sistemi ve IMU

Genel olarak, Uzaktan Algılama Platformlarının yerini belirlemek için GNSS sistemleri kullanılır. Laboratuvarında oluşturulan sistemde, mesafenin kısa olması ( $\sim 1$  m) nedeniyle GNSS yerine yatay olarak hassas mesafe ölçen VL53L0XV2 model lazerli mesafe ölçer kullanılarak konum bilgisi elde edildi. Uzaktan algılama platformlarının konum bilgisinin yanı sıra, uçuş davranışını (attitude) belirlemek için bir Atalet Ölçüm Birimi (IMU: genellikle bir ivmeölçer, bir jiroskop ve bir manyetometre içerir) kullanılarak ivmelenme, yunuslama (pitch), yuvarlanma/yalpa (roll) ve sapma/dönme (yaw) verileri de kullanılır. Bu sistemde, ivmelenme, yunuslama, yuvarlanma/yalpa, sapma/dönme sensörlerinden bilgi almak için MPU6050 model IMU benimsendi (Şekil 4.1). Platformun kullanıldığı ortamda zemine boyutları bilinen çeşitli şekillerde nesneler Şekil 4.2’deki gibi yerleştirildi ve dış ortam simüle edildi. Zemine yerleştirilen nesnelerin gerçek boyutları Tablo 4.1’de verildi.



Şekil 4.2. Laboratuvar ortamında simülasyon deneysel çalışma alanına genel bakış

Tarama işlemi sırasında konum bilgisi ( $r_{LMÖ}$ ) elde etmek için kullanılan VL53L0XV2 model LMÖ, yere paralel hareket edecek şekilde konumlandırıldı.

Tablo 4.1. Şekil 4.2’de etiketlenmiş hedef nesne bilgileri

| Hedef             | X3D Eksenlerine Göre Gerçek Boyut (m) |
|-------------------|---------------------------------------|
| Birinci (sarı):   | $x = 0.215, y = 0.075, z = 0.180$     |
| İkinci (pembe):   | $x = 0.21, y = 0.190, z = 0.08$       |
| Üçüncü (mavi):    | $x = 0.20, y = 0.025, z = 0.05$       |
| Dördüncü (beyaz): | $h = 0.20, r = 0.028$                 |

Bu LMÖ, X3D dosya formatının z-ekseninde ilerleyecek şekilde konumlandırılarak her nokta için  $z_n$  değerleri elde edildi. Sistem hareket halindeyken lazer tarayıcı hareket yönüne dik açılar yapılarak her ölçüm için farklı  $\theta_n$  açısı değerleri elde edildi. Lazer tarayıcıdan ölçülen açı değerleri ( $\theta_n$ ) ve mesafe değerleri (hipotenüs =  $r_n$ ) kullanılarak Şekil 4.2’de gösterilen dik üçgenin dikey kenar uzaklıkları Tablo 4.2’deki denklemlerden hesaplanarak veri elde etme sürecinde her nokta için  $x_n$  ve  $y_n$  koordinatları elde edildi. Burada doğrudan kartezyen koordinatların kullanılmasının sebebi, platformun herhangi bir yunuslama (pitch), yuvarlanma/yalpa (roll), sapma/dönme (yaw) hareketi yapmamasıdır.

Tablo 4.2. Simülasyon sisteminin X3D sahnesi eksenlerine uygun denklemleri

| Terimler                              | Tanımlama                            |
|---------------------------------------|--------------------------------------|
| n noktası için ölçülen mesafe (cm)    | $r_n$                                |
| n noktası için ilerleme mesafesi (mm) | $r_{LMÖ}$                            |
| n noktasının x koordinatı (m)         | $x_n = (\sin\theta_n \cdot r_n)/100$ |
| n noktasının y koordinatı (m)         | $y_n = (\cos\theta_n \cdot r_n)/100$ |
| n noktasının z koordinatı (m)         | $z_n = r_{LMÖ}/1000$                 |

#### 4.2. Simülasyon Platformu için LiDAR Veri İşleme ve Gerçek Zamanlı Haritalama

Veri alma ve görselleştirme algoritması Şekil 4.3’te verilen C kodlarının derlendiği Raspberry Pi 4B’de, sensörlerden gelen tüm veriler anlık olarak üzerindeki MySQL veri tabanına kaydedildi. Raspberry Pi 4B, dahili 2.4/5.0 GHz Wifi modülü ile laboratuvar ortamında ortak bir internet ağına (modem) bağlanabilir. Bu özellik ile güvenli uzaktan

oturum açma yöntemi olan SSH (Security SHell) protokolü kullanılarak Yer Kontrol ve Kayıt İstasyonu olarak tanımlanan başka bir bilgisayarla bağlantı kuruldu. Bu bağlantı yöntemi ile Raspberry Pi 4B üzerinde çalışan MySQL veri tabanından elde edilen anlık verilere, Yer Kontrol ve Kayıt İstasyonu üzerinde geliştirilen web arayüzü üzerinden anlık (online) kablosuz uzaktan erişim sağlanarak gerçek zamanlı 3 boyutlu nokta bulutu elde edildi. Yaklaşık 1 dakikada toplamda 114.438 adet 3B nokta koordinatı (x, y, z) elde edilen verilerin MySQL arayüzünde gösterimi Şekil 4.4'te verildi. Web arayüzü, HTML5 ve X3D dosya formatı kullanılarak geliştirildi. Veriler, veri tabanından PHP programlama dili ve jQuery betik dili kullanılarak X3D etiketlerinden `<PointSet><Coordinate point="x, y, z" /><PointSet/>` etiketinde "point" parametresine çekildi. Lazer tarayıcı ve diğer sensörlerden alınan veriler ile ölçülen her bir nokta için yaklaşık 1 dakikada x, y koordinat ve z değeri bilgisi elde edildi. Bu süre zarfında 114.438 adet x, y koordinat ve z değeri için anlık 3 boyutlu görselleştirme yapıldı. Bu veri elde etme ve görselleştirme süreci Şekil 4.3'te verilen 6, 8, 9, 10 döngüleri eşzamanlı bir şekilde çalışması ile gerçekleşti.

| UZAKTAN ALGILAMA PLATFORMU     |                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
|--------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1                              | # Veri tabanına (MySQL) bağlan<br># Veri tabanına tarih/zaman damgalı tablo oluştur                                                                                                                                                                                                           |
| 2                              | # SF45B (Lazer Tarayıcı) çalıştır: n noktası için ölçülen mesafe (cm)<br>#degisken(ler): mesafe ( $r_n$ ), açı ( $\theta$ )                                                                                                                                                                   |
| 3                              | # VL53LOXV2 (z ekseninde ilerleme) lazer mesafe ölçer (LMÖ) çalıştır: Konum (mm)<br>#degisken(ler): ilerleme ( $r_{LMÖ}$ )                                                                                                                                                                    |
| 4                              | # MPU6050 (Davranış bilgisi için IMU) çalıştır: ivmelenme ( $m/s^2$ ), davranış (rad/s)<br>#degisken(ler): ax, ay, az; yunuslama (pitch), yuvarlanma/yalpa (roll) ve sapma/dönme (yaw)                                                                                                        |
| 5                              | # x, y, z koordinatlar: (m)<br># Sıfırlama:<br>mesafe, açı, ilerleme, x, y, z = 0                                                                                                                                                                                                             |
| 6                              | while {<br>mesafe, açı, ilerleme, ax, ay, az, pitch, roll, yaw<br>$x = (\sin(\text{açı}) * \text{mesafe})/100$<br>$y = (\cos(\text{açı}) * \text{mesafe})/100$<br>$z = \text{ilerleme}/1000$<br>Veri tabanına kayıt (x, y, z, [mesafe, açı, ilerleme, ax, ay, az, pitch, roll, yaw] )<br>}    |
| YER KONTROL VE KAYIT İSTASYONU |                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
| 7                              | # Web arayüzünden Uzak Veri tabanına (MySQL) bağlan                                                                                                                                                                                                                                           |
| 8                              | # Uzak Veri tabanından verileri Yer Kontrol İstasyonundaki veri tabanına < 500 ms aralıkla kopyala                                                                                                                                                                                            |
| 9                              | # Yer Kontrol İstasyonundaki veri tabanındaki verileri < 500 ms aralıkla web arayüzüne PHP ve jQuery ile al                                                                                                                                                                                   |
| 10                             | # HTML5 + X3D etiketleri kullanılarak 3B nokta bulutu görselleştirme yap:<br><PointSet><br><Coordinate point="x <sub>1</sub> , y <sub>1</sub> , z <sub>1</sub> , x <sub>2</sub> , y <sub>2</sub> , z <sub>2</sub> , ..., x <sub>n</sub> , y <sub>n</sub> , z <sub>n</sub> " /><br></PointSet> |

Şekil 4.3. Kartezyen koordinatlarda veri elde etme ve görselleştirme algoritması

phpMyAdmin

Son Sık kullanılanlar

Yeni

- esp\_data
- harita
- harita4
- Yeni
- tarama2212
- tarama2212\_d
- tarama\_2312\_2
- tarama\_2312\_2c
- tarama\_2312\_2d
- tarama\_2312\_3
- tarama\_2412
- tarama\_2412\_1
- tarama\_2412\_1y
- tarama\_2412\_1y\_islem
- tarama\_2412\_1y\_y
- tarama\_2412\_1y\_y\_y
- tarama\_2412\_2

Sunucu: localhost:3307 Veritabanı: harita4 Tablo: tarama\_2412\_1y

Gözet Yapı SQL Ara Ekle Dışa aktar İçe aktar Yetkiler

✓ Gösterilen satır 0 - 24 (toplam 114438, Sorgu 0,0262 saniye sürdü.) [z: 0.799... - 0.799...]

SELECT \* FROM `tarama\_2412\_1y` ORDER BY `z` DESC

1 > >> Satır sayısı: 25 Satırları süz: Bu tabloda ara Anahtara göre sı

+ Seçenekler

|                                                                                                | id    | mesafe | aci    | ilerleme | x         | y            | z     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|--------|--------|----------|-----------|--------------|-------|
| <input type="checkbox"/> Düzenle <input type="checkbox"/> Kopyala <input type="checkbox"/> Sil | 22272 | 99     | -9.05  | 799      | -0.155723 | 0.00732409   | 0.799 |
| <input type="checkbox"/> Düzenle <input type="checkbox"/> Kopyala <input type="checkbox"/> Sil | 22273 | 100    | -9.38  | 799      | -0.162982 | -0.00162913  | 0.799 |
| <input type="checkbox"/> Düzenle <input type="checkbox"/> Kopyala <input type="checkbox"/> Sil | 22274 | 100    | -9.72  | 799      | -0.168833 | -0.000644579 | 0.799 |
| <input type="checkbox"/> Düzenle <input type="checkbox"/> Kopyala <input type="checkbox"/> Sil | 22275 | 99     | -10.17 | 799      | -0.174804 | 0.0105547    | 0.799 |
| <input type="checkbox"/> Düzenle <input type="checkbox"/> Kopyala <input type="checkbox"/> Sil | 22276 | 100    | -10.51 | 799      | -0.182407 | 0.00177692   | 0.799 |
| <input type="checkbox"/> Düzenle <input type="checkbox"/> Kopyala <input type="checkbox"/> Sil | 22277 | 100    | -10.85 | 799      | -0.188238 | 0.00287663   | 0.799 |
| <input type="checkbox"/> Düzenle <input type="checkbox"/> Kopyala <input type="checkbox"/> Sil | 22278 | 100    | -11.3  | 799      | -0.195946 | 0.00438534   | 0.799 |
| <input type="checkbox"/> Düzenle <input type="checkbox"/> Kopyala <input type="checkbox"/> Sil | 22279 | 101    | -11.63 | 799      | -0.203607 | -0.00426455  | 0.799 |

Şekil 4.4. Yaklaşık 1 dakika sürede alınmış LiDAR verilerinin MySQL veri tabanında verilerin görünümü. Ölçülen nokta sayısı 114.438 adettir

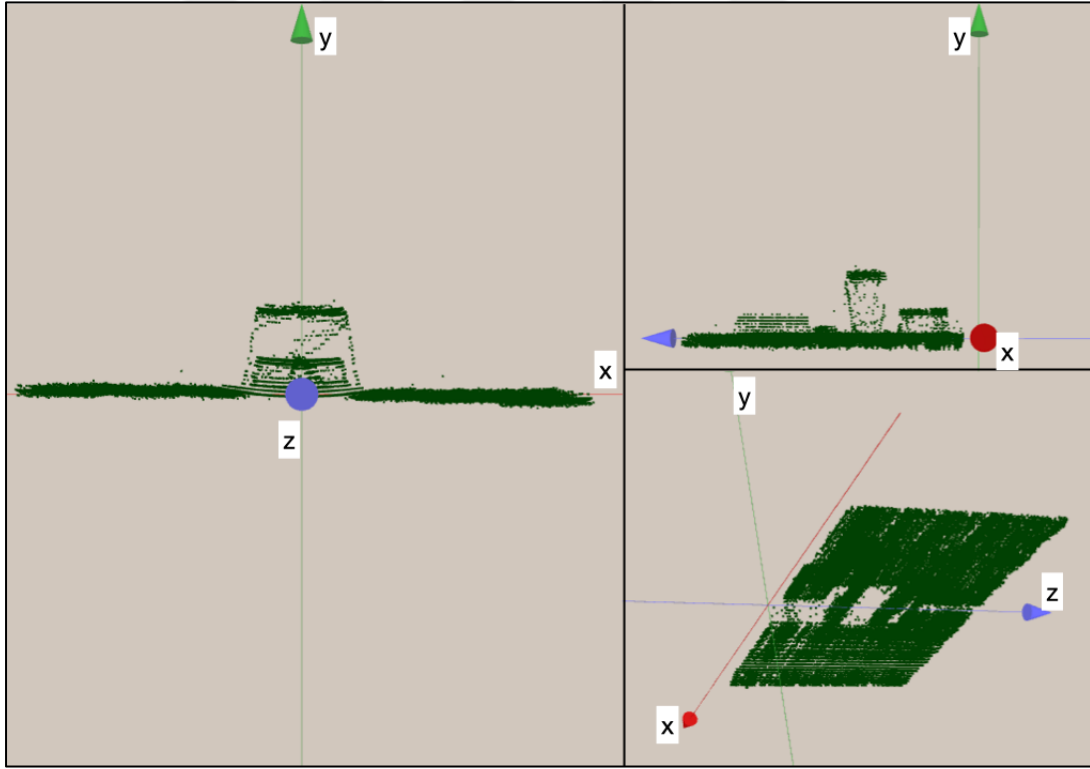
Deneyisel yöntemi Bölüm 3’te verilen “Platformdan Bağımsız Web Tabanlı Gerçek Zamanlı LiDAR Haritalama” sisteminin, Yer Kontrol ve Kayıt İstasyonunda oluşturulan web arayüzü ile anlık veriler alındı. Web arayüzünde ilgili veri tablosu seçilerek “3B Nokta Bulutunu Göster” butonu tıklanarak tarama sonucu elde edilen 3B nokta bulutunun görüntülediği web sayfasına yönlendirildi (Şekil 4.5).



Şekil 4.5. 3B Nokta Bulutu görselleştirme web arayüzü

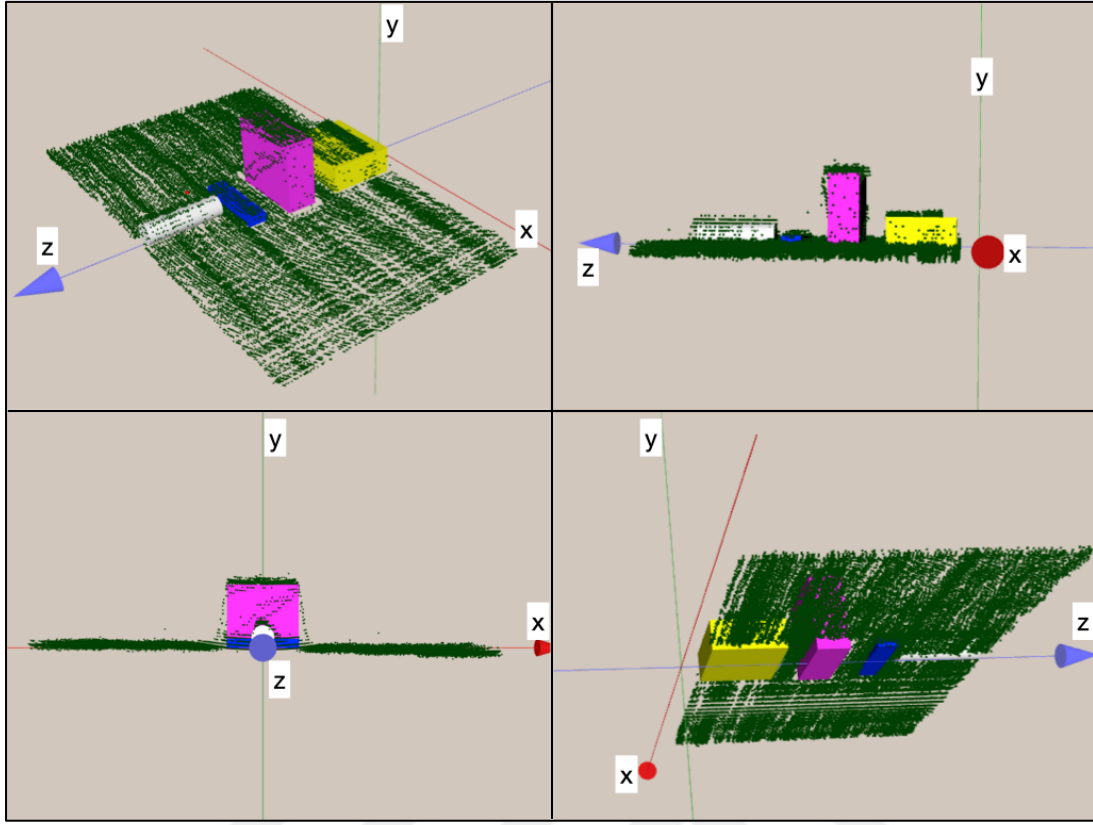
Bu veriler anlık, kablosuz ve uzaktan erişim ile elde edildi. Elde edilen veriler, platformdan bağımsız bir web tarayıcısında çalışabilen Web3D standardı olan XML tabanlı X3D (Extensible 3D) dosya formatı kullanılarak 3 boyutlu nokta bulutu olarak görselleştirildi.

Şekil 4.6’de, anlık verilerle eş zamanlı olarak çıkarılan nokta bulutu haritasını gösterilmektedir. Şekil 4.7, X3D sahnesindeki nesnelerle örtüşen 3B nokta bulutunu göstermektedir. Şekil 4.6 ve Şekil 4.7’de görüldüğü gibi, tarama işlemi sırasında IMU ve X3D dosya formatı arasında koordinat dönüşümleri yapılmıştır. Bu dönüşümlere göre IMU’nun +y-ekseni X3D dosya formatında +z-eksenidir ve sayfa düzleminden dışı doğrudur. IMU’nun +z-ekseni, X3D dosya formatında yukarıyı gösteren +y-eksenidir (yeşil renkli eksen). IMU’nun +x-ekseni, X3D dosya formatındaki +x-ekseni (kırmızı renkli eksen) ile aynıdır ve sağdadır.



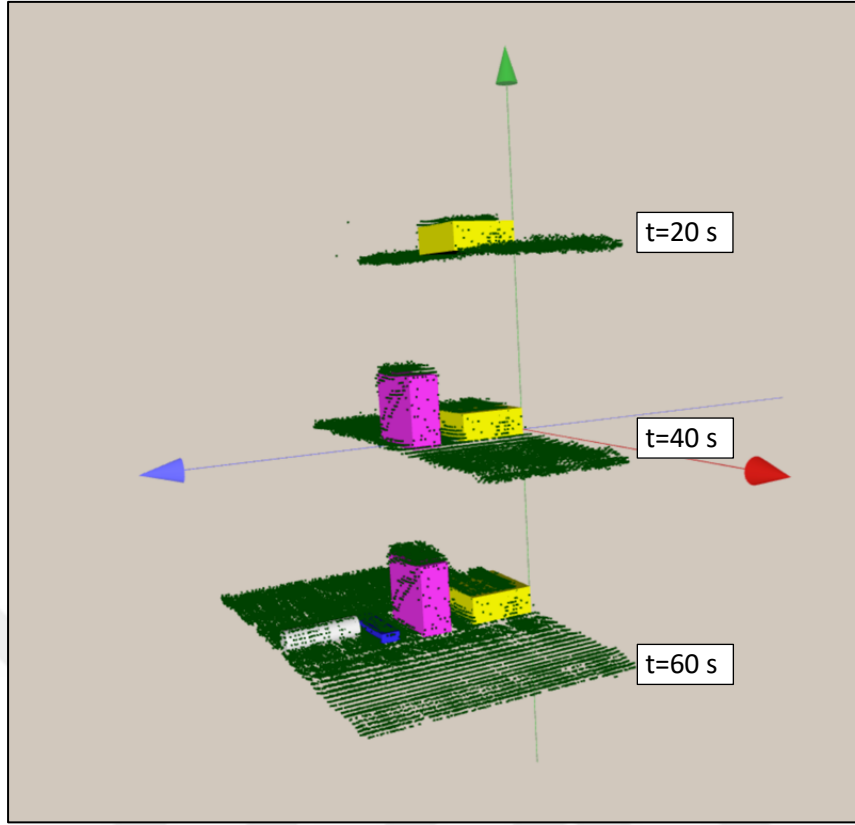
Şekil 4.6. X3D sahnesinde nesnelerin 3B nokta bulutları

Sabit bir yükseklikte hareket ettirilen lazer tarayıcı tarafından başlangıçta ölçülen yükseklik değeri referans olarak kabul edildi (0,985 m). Ölçülen tüm ardışık konumlardan zemine olan mesafeler, bu referans değerinden (y-ekseni için) çıkarılarak elde edildi.

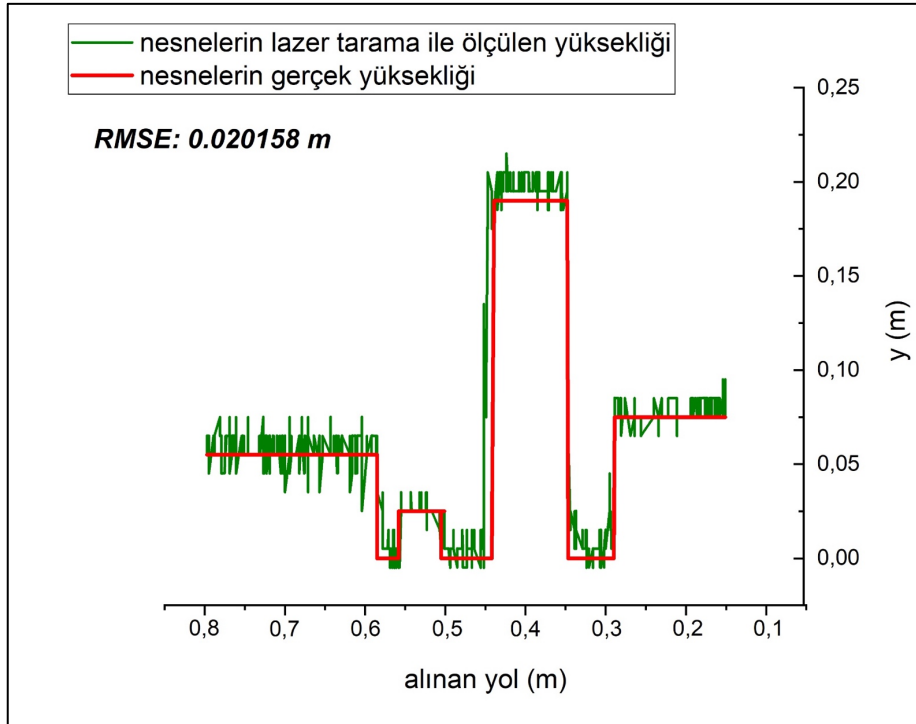


Şekil 4.7. X3D sahnesindeki nesnelerle örtüşen 3D nokta bulutu

Daha sonra geliştirilen simülasyon ile eş zamanlı ve kablosuz olarak elde edilen verilerin 3 boyutlu nokta bulutunun doğruluğu değerlendirildi. Bunun için X3D sahnesindeki ilgili nesnelerin gerçek boyutları Yer Kontrol ve Kayıt İstasyonunda oluşturuldu. Gerçek nesnelerin X3D sahnesinde çeşitli zaman aralıklarında taranan yüzeydeki görünümü Şekil 4.8’de verilmiştir. Doğruluk karşılaştırması, platformdan bağımsız gerçek zamanlı LiDAR sistemi ile ölçülen cisimlerin yükseklikleri ve cisimlerin gerçek yükseklikleri arasında Şekil 4.9’daki gibi yapıldı. Karşılaştırmada Root Mean Square Error (RMSE) 0,020158 m olarak hesaplandı. Diğer bir deyişle, gerçek nesne yükseklikleri ile ölçülen yükseklikler arasında %2’lik bir değişim gözlemlendi. Ölçümlerin kullanılan lazer tarayıcının doğruluk değerleri içerisinde olduğu görüldü. Bu sistem, sabit yükseklikte ve sabit hızda bir uzaktan algılama platformu olmakla birlikte, IMU’dan elde edilen bilgilerin de verileri gerçekçi bir şekilde işlendi. IMU’dan elde edilen veriler, x, y, z eksenini için ayrı ayrı  $m/s^2$  birimindeki ivme değerlerinden ve x-ekseni yunuslama (pitch), y-ekseni yuvarlanma/yalpa (roll), z-ekseni sapma/dönme (yaw) için ayrı ayrı rad/s birimindeki jiroskop açısı değerlerinden oluşmaktadır.

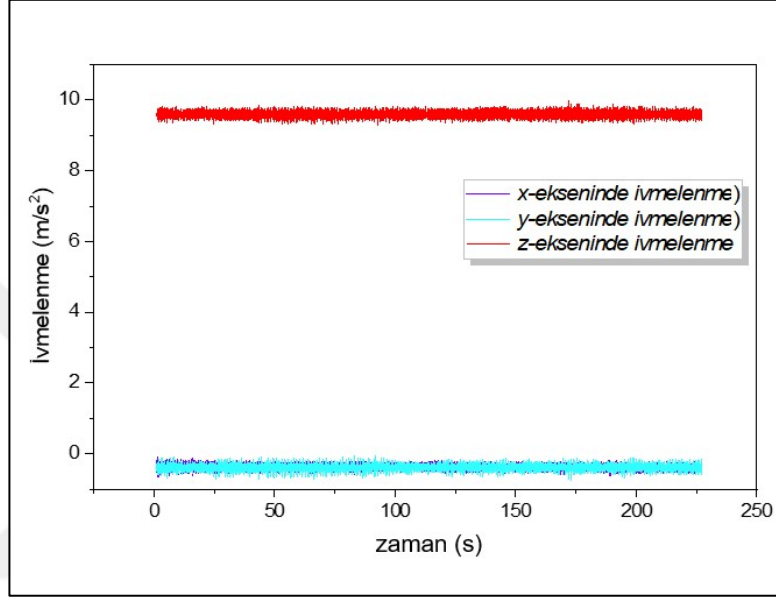


Şekil 4.8. Farklı zaman dilimlerinde taranan yüzeyde gerçek nesnelerin X3D sahnesinde görünümü

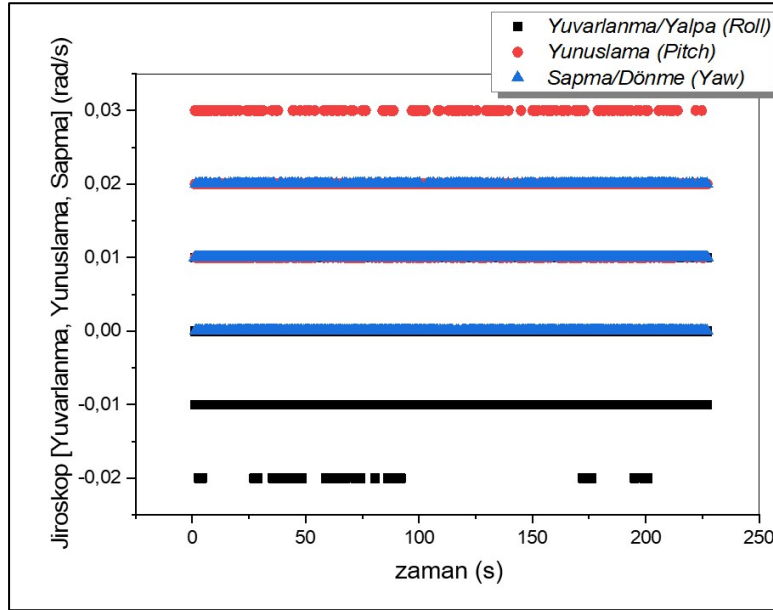


Şekil 4.9. Nesnelerin lazer tarama ile ölçülen yüksekliği ve nesnelerin gerçek yüksekliği arasındaki doğruluk karşılaştırması

Tarama işlemi sırasında her üç eksen için elde edilen ivme değişimleri ve jiroskop değişimleri sırasıyla Şekil 4.10 ve Şekil 4.11’de gösterildi. Ayrıca yerçekimi ivmesi, IMU’nun z-eksenindeki hassasiyetine göre  $\sim 9,80 \text{ m/s}^2$  olarak ölçüldü (Şekil 4.10). Bu veriler laboratuvar ortamında değişmemekle birlikte hesaplamalarda kullanıldı. Böylece, bu yöntemin alçak irtifa İHA-LiDAR sistemi içeren sistemlere (gerçek ortamlar için) uyarlanabilir bir simülasyonu elde edildi.



Şekil 4.10. Her üç eksende ivme değişiklikleri



Şekil 4.11. Her üç eksende yunuslama (pitch), yuvarlanma/yalpa (roll) ve sapma/dönme (yaw) değişiklikleri

### 4.3. Değerlendirme

Bu çalışmada Platformdan Bağımsız Web Tabanlı Gerçek Zamanlı LiDAR Haritalama sistemi simülasyonu tasarlandı. Tasarlanan sistem, hedef bazlı uçuş planlama ve uçuş sonrası veri işleme süreçlerini kısaltmaktadır. Laboratuvarda geliştirilen bu Platformdan Bağımsız Web Tabanlı Gerçek Zamanlı LiDAR Haritalama sistemi ile anlık olarak veriler elde edilmekte, bu sayede söz konusu alandaki değişim tespit edilebileceği ve sorunlara hızlı çözümler üretilebileceği öngörülmektedir. Simülasyon sistemi, 3B nokta bulutu üretir ve veriler daha sonra analiz edilmek üzere bir veri tabanında saklanır. Bu sayede uzak kullanıcıların kullanımına sunulabilir.

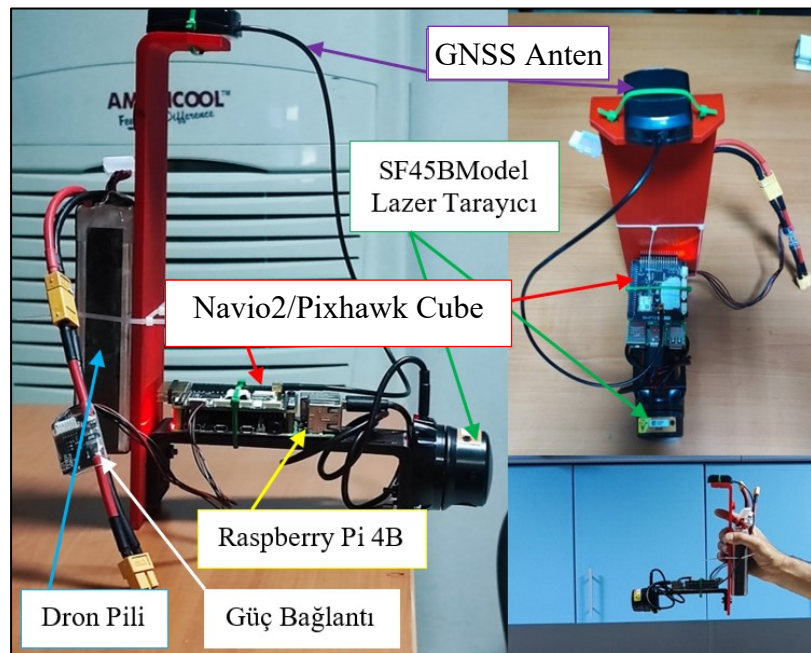


## 5. ELLE TAŞINABİLİR PLATFORMDA LİDAR HARİTALAMA

Önceki bölümde laboratuvar ortamında simüle edilen, Platformdan Bağımsız Web Tabanlı Gerçek Zamanlı LiDAR Haritalama sistemi, gerçek sistemlerde kullanılan tüm sensörlerden gelen verileri test etmek için elle taşınabilir platform özellikte genişletildi. Bu genişletme, uzaktan algılama platformu olarak insan ya da bir araç tarafından yerde taşınabilen bir platforma uyarlanabilecek özelliktedir. Bu bölümde laboratuvar dışında yeryüzünde bir insan ya da araç tarafından taşınabilen lazerle tarama deney sistemi ve bileşenleri verilmiştir. Deney sistemi ile elde edilen LiDAR verileri ve oluşturulan gerçek zamanlı 3B haritalama sonuçları sunulmuştur.

## 5.1. Deneysel Sistem

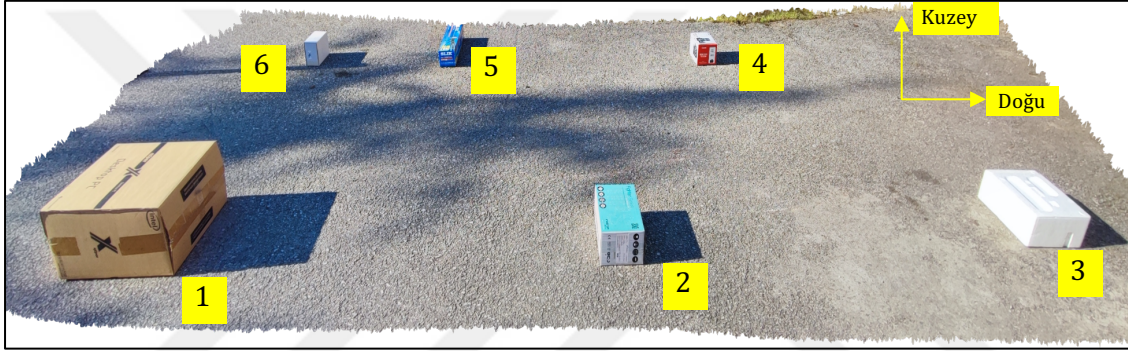
Bu tez çalışmasının uygulama aşamasının ikincisinde, “Platformdan Bağımsız Web Tabanlı Gerçek Zamanlı LiDAR Haritalama sistemi” yöntemini taşınabilen ortamlar için ortaya koymak amacıyla elle taşınabilir yani platformdan bağımsız ve gerçek ortam bileşenlerine uyarlanabilen bir deney sistemi oluşturuldu (Şekil 5.1). Burada gerçek zamanlı tarama işlemleri için uzaktan algılama platformu olarak yeryüzünde elle taşıma yöntemi kullanıldı. Normal yürüyüş ile dış ortamda hareket eden platformun ardışık konumlarından yere olan mesafeler bir dizi tarama yapılarak ölçüldü.



Şekil 5.1. Elle taşınabilir platform bağımsız LiDAR sistemi

Önceki deney sisteminde olduğu gibi burada da SF45B model lazer tarayıcı yere bakacak şekilde görüş alanı (FOV: Field of View) yaklaşık 60° ye ayarlandı. Elle taşınabilir platform dış ortamda ve artık geniş alanlarda kullanıldığından konum ve davranış (attitude) bilgisi GNSS ve IMU sistemlerinden yararlanılarak elde edildi. Ayrıca deneysel çalışmalarda teknik özellikleri Tablo 3.2 ve Tablo 3.3'te verilen iki ayrı uçuş kontrol sistemi kullanıldı. İki ayrı uçuş kontrol kartı kullanılmasının amacı geliştirilen sistemin her uçuş sistemine uyarlanabilirliğini göstermek içindir.

Elle taşınabilir platform bağımsız LiDAR sisteminin kullanıldığı ortamda zemine boyutları Tablo 5.1'de verilen çeşitli şekillerde nesneler Şekil 5.2'deki gibi yerleştirildi.



Şekil 5.2. Elle taşınabilir platform bağımsız LiDAR sistemi için deneysel çalışma alanına genel bakış (~8x5m<sup>2</sup>)

Tablo 5.1. Şekil 5.2'de etiketlenmiş hedef nesne bilgileri

| Hedef             | X3D Eksenlerine Göre Gerçek Boyut (m) |
|-------------------|---------------------------------------|
| 1 numaralı nesne: | $x = 0.5, y = 0.27, z = 0.50$         |
| 2 numaralı nesne: | $x = 0.21, y = 0.14, z = 0.32$        |
| 3 numaralı nesne: | $x = 0.28, y = 0.14, z = 0.36$        |
| 4 numaralı nesne: | $x = 0.17, y = 0.14, z = 0.22$        |
| 5 numaralı nesne: | $x = 0.13, y = 0.11, z = 0.53$        |
| 6 numaralı nesne: | $x = 0.10, y = 0.15, z = 0.22$        |

Elle taşınabilir platform bağımsız LiDAR sistemi ile ardışık konumlardan zemine olan mesafeler bir dizi tarama yapılarak ölçüldü. Tarama işleminde artık doğrusal hareket olmadığından dolayı platformun küresel koordinat sistemine göre hareketi hesaplamalara



Tablo 5.2. Platform bağımsız sistemin X3D sahnesi eksenlerine uygun denklemleri

| Terimler                                            | Tanımlama                                                        |
|-----------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|
| n noktası için ölçülen mesafe (m) ve açı (derece)   | $r_n, \theta_n$                                                  |
| n noktası için platformun x, y konum bilgisi (m)    | $k_x, k_y$                                                       |
| n noktası için platformun x, y, z hız bilgisi (m/s) | $\vartheta_x, \vartheta_y, \vartheta_z$                          |
| n noktası için platformun davranış bilgisi (derece) | $pitch, roll, yaw(\varphi)$                                      |
| n noktasının X3D sahnesi için x koordinatı (m)      | $x_n = (r_n \cdot \sin\theta_n \cdot \cos\varphi_n) + (\pm k_x)$ |
| n noktasının X3D sahnesi için y koordinatı (m)      | $y_n = r_n \cdot \cos\theta_n$                                   |
| n noktasının X3D sahnesi için z koordinatı (m)      | $z_n = (r_n \cdot \sin\theta_n \cdot \sin\varphi_n) + (\pm k_z)$ |

## 5.2. Elle Taşınabilir Platformda LiDAR Veri İşleme ve Gerçek Zamanlı Haritalama

Veri alma ve görselleştirme algoritması şematik olarak Şekil 5.4'te verilen Python kodlarının derlendiği Raspberry Pi 4B'de, sensörlerden (Lazer tarayıcı, GNSS ve IMU) gelen tüm veriler anlık ve eşzamanlı olarak üzerindeki MySQL veri tabanına kaydedildi. Python derlemesinin tercih edilme nedeni hem SF45B lazer tarayıcının hem de Navio2/Pixhawk Cube uçuş kontrol kartlarının ArduPilot ve Raspberry Pi entegrasyonu olduğu içindir. Raspberry Pi 4B'nin, Wifi modülü ile mobil modem (cep telefonu) ortak internet ağı üzerinden güvenli uzaktan oturum açma yöntemi olan SSH protokolü kullanılarak Yer Kontrol ve Kayıt İstasyonu olarak tanımlanan başka bir bilgisayarla bağlantısı kuruldu. Bu bağlantı ile Raspberry Pi 4B üzerinde çalışan MySQL veri tabanından elde edilen anlık verilere, Yer Kontrol ve Kayıt İstasyonu üzerinde geliştirilen web arayüzü üzerinden yine anlık kablosuz uzaktan erişim sağlanarak gerçek zamanlı 3 boyutlu nokta bulutu elde edildi. Navio2/Pixhawk Cube uçuş kontrol kartlarından alınan GNSS, IMU bilgilerinden faydalanılarak GNSS sistemine göre xy düzlemi boyunca (x-kuzey, y-doğu) tarama işlemi gerçekleştirildi. Yapılan deneysel çalışmada yaklaşık 5 dakika sürede toplamda 6727 adete 3B nokta koordinatı (x, y, z) elde edilen tarama verilerinin MySQL arayüzünde gösterimi Şekil 5.5'te verildi. Web arayüzü, HTML5 ve X3D dosya formatı kullanılarak geliştirildi. Veriler, veri tabanından PHP programlama dili ve jQuery betik dili kullanılarak X3D etiketlerinden `<PointSet><Coordinate point="x, y, z" /></PointSet>` etiketinde "point" parametresine çekildi.

| UZAKTAN ALGILAMA PLATFORMU     |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
|--------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1                              | # Veri tabanına (MySQL) bağlan<br># Veri tabanına tarih/zaman damgalı tablo oluştur                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
| 2                              | # SF45B (Lazer Tarayıcı) çalıştır: n noktası için ölçülen mesafe (m)<br>#degisken(ler): mesafe ( $r_n$ ), açı ( $\theta$ )                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| 3                              | # Navio2/Pixhawk Cube Uçuş Kontrol Kartından (x-kuzey, y-doğu) platformun x, y koordinat bilgisi ( $k_x$ , $k_y$ ) (m)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
| 4                              | # Navio2/Pixhawk Cube Uçuş Kontrol Kartından (Davranış bilgisi için IMU) çalıştır: hız (m/s), davranış (rad/s)<br>#degisken(ler): $\theta_x$ , $\theta_y$ , $\theta_z$ ; yunuslama (pitch), yuvarlanma/yalpa (roll) ve sapma/dönme (yaw)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
| 5                              | # x, y, z koordinatlar: (m), Referans yükseklik (ref) (m)<br># Sıfırlama-> mesafe, açı, $k_x$ , $k_y$ , x, y, z, ref = 0,                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
| 6                              | while<br>mesafe, açı, $k_x$ , $k_y$ , $\theta_x$ , $\theta_y$ , $\theta_z$ , pitchD = 57.2958*pitch, rollD = 57.2958*roll, yawD = 57.2958*yaw<br>#yaw açısına göre gidilen yön belirleme<br>$x = (\sin(\text{açı}) * \text{mesafe} * \cos(\text{yawD})) + (\pm k_y)$<br>$y = \text{ref} - (\cos(\text{açı}) * \text{mesafe})$<br>$z = (\sin(\text{açı}) * \text{mesafe} * \sin(\text{yawD})) + (\pm k_x)$<br>kayıt_zamanı<br>Veri tabanına kayıt (x, y, z, [mesafe, açı, $k_x$ , $k_y$ , $\theta_x$ , $\theta_y$ , $\theta_z$ , pitch, roll, yaw, kayıt_zamanı] ) |
| YER KONTROL VE KAYIT İSTASYONU |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| 7                              | # Web arayüzünden Uzak Veri tabanına (MySQL) bağlan                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
| 8                              | # Uzak Veri tabanından verileri Yer Kontrol İstasyonundaki veri tabanına < 500 ms aralıkla kopyala                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| 9                              | # Yer Kontrol İstasyonundaki veri tabanındaki verileri < 500 ms aralıkla web arayüzüne PHP ve jQuery ile al                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
| 10                             | # HTML5 + X3D etiketleri kullanılarak 3B nokta bulutu görselleştirme yap:<br><PointSet><br><Coordinate point="x <sub>1</sub> y <sub>1</sub> z <sub>1</sub> x <sub>2</sub> y <sub>2</sub> z <sub>2</sub> ... x <sub>n</sub> y <sub>n</sub> z <sub>n</sub> " /><br></PointSet>                                                                                                                                                                                                                                                                                      |

Şekil 5.4. Navio2/Pixhawk Cube uçuş kontrol kartları ile veri elde etme ve görselleştirme algoritması

Lazer tarayıcı ve diğer sensörlerden alınan veriler ile ölçülen her bir nokta için yaklaşık 5 dakikada x, y koordinat ve z değeri bilgisi elde edildi. Bu süre zarfında 6727 adet x, y koordinat ve z değerleri için anlık 3 boyutlu görselleştirme yapıldı. Bu veri elde etme ve görselleştirme süreci, Şekil 5.3'te verilen 6, 8, 9, 10 döngülerinin eşzamanlı bir şekilde çalışması ile gerçekleşti. Geliştirilen sistemde tarama anında veriler veri tabanına kayıt yapılırken x, y koordinatları ve z değerleri dik üçgen yöntemi ile hesaplanarak veri tabanına eklenmektedir. Bu deneysel aşamada önceki aşama için tasarlanan web arayüzü daha da geliştirildi. Arayüzde yapılan geliştirme ile taşınan platform (Raspberry Pi 4B) üzerindeki yük %80 oranında ortadan kaldırıldı. 3B görselleştirme işlemi Yer Kontrol ve Kayıt İstasyonunda yapıldığından dolayı Uzaktan Algılama Platformundaki (İnsansız Hava Aracı) yük azaltılmış oldu. Bu geliştirme, önceki deneysel çalışmalar için geliştirilen web arayüzünde önemli değişiklikler yapılarak sağlandı.

Veritabanı: lidar - Tablo: lid\_24\_04\_2023\_17\_40\_19\_yd\_2

Gözet Yapı SQL Ara Ekle Dışa aktar İçe aktar Yetkiler İşlemler Tetikleyiciler

Gösterilen satır 0 - 24 (toplam 6727, Sorgu 0,0000 saniye sürdü.) [id: 540... - 564...]

SELECT \* FROM `lid\_24\_04\_2023\_17\_40\_19\_yd\_2` ORDER BY `id` ASC

Sütun düzenini geri yükle Satır sayısı: 25 Satırları süz: Bu tabloda ara Anahtara göre sırala: PRIMARY (ASC)

|                                                                                                | id  | firstRow | sicaklik | yawAngle | kart_x    | kart_y   | yazilim_y        | yazilim_x          | yazilim_z           | pitch         | yaw               | roll |
|------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|----------|----------|----------|-----------|----------|------------------|--------------------|---------------------|---------------|-------------------|------|
| <input type="checkbox"/> Düzenle <input type="checkbox"/> Kopyala <input type="checkbox"/> Sil | 540 | 1.27     | 39.28    | -27.13   | -0.144715 | 0.248576 | 1.13026718299416 | 0.2485764424460705 | -0.7238492665863295 | 4.60208577805 | 88.50657230808734 | -1.2 |
| <input type="checkbox"/> Düzenle <input type="checkbox"/> Kopyala <input type="checkbox"/> Sil | 541 | 1.27     | 39.28    | -27.13   | -0.144715 | 0.248576 | 1.13026718299416 | 0.2485764424460705 | -0.7238492665863295 | 4.60208577805 | 88.50657230808734 | -1.2 |
| <input type="checkbox"/> Düzenle <input type="checkbox"/> Kopyala <input type="checkbox"/> Sil | 542 | 1.27     | 39.53    | -27.29   | -0.144715 | 0.248576 | 1.12864553108201 | 0.2485764424460705 | -0.727003305786047  | 4.60208577805 | 88.50657230808734 | -1.2 |

Şekil 5.5. Yaklaşık 5 dakika sürede alınmış 6727 adet LiDAR verisinin MySQL veri tabanında verilerin görünümü

Yapılan gelişmeler sırasıyla kullanıcı girişi (Şekil 5.6a), kullanıcı kayıt ekranı (Şekil 5.6b), uzak-yerel 3B Nokta Bulut Haritası Görüntüleme Arayüzü (Şekil 5.7), Veri akışı (Şekil 5.8) ve 3B nokta bulutu (Şekil 5.9) alanları oluşturuldu.

**a)**

Lütfen Giriş Yapın!

**İHA LiDAR {LC}**

E-posta adresi

Şifre

☐ Beni hatırla!

**Giriş**

Kayıtlı değil misin? [Üye ol](#)

© 2018–2023  
Oluşturan Levent Candan  
Tema için Bootstrap'e teşekkürler.

**b)**

Kayıt

**İHA LiDAR {LC}**

Ad Soyad

E-posta adresi

Şifre

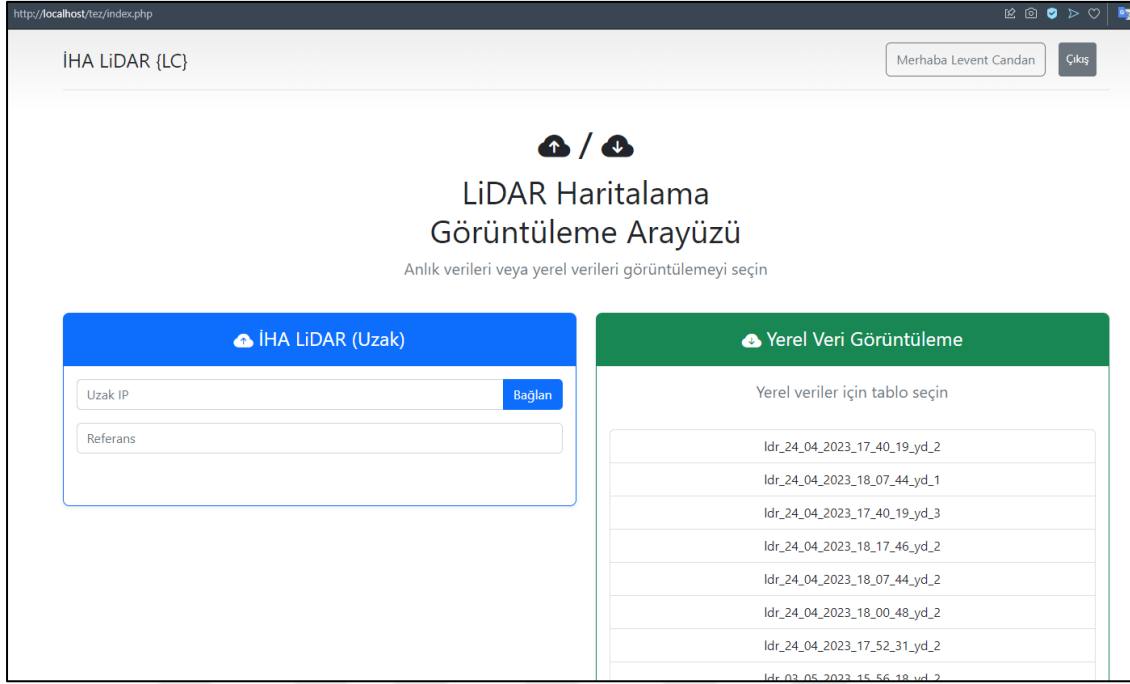
**Kayıt Ol**

Üye misin? [Giriş yap](#)

© 2018–2023  
Oluşturan Levent Candan  
Tema için Bootstrap'e teşekkürler.

Şekil 5.6. Kullanıcı girişi (a) ve kayıt olma (b) web arayüzü

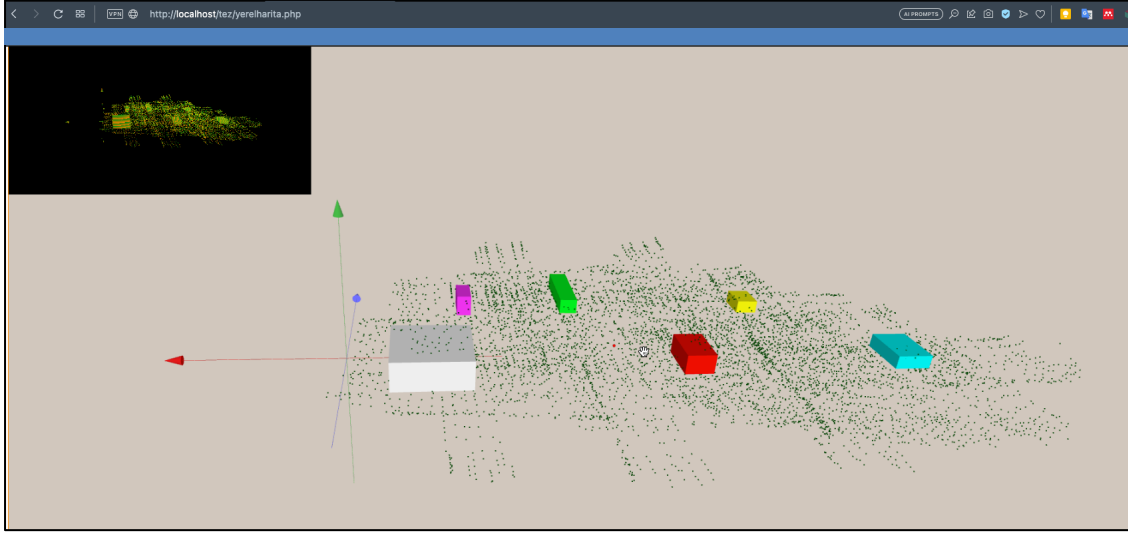
Geliştirilen web arayüzünde daha sonra farklı kullanıcılar tarafından incelenmesi için veriler her çalışmada ayrı bir zaman damgası ile kayıt edilmiş ayrı tablolar seçilerek ilgili alanın Şekil 5.9'daki gibi 3B nokta bulutu görüntülenmektedir. Taranan yüzeyin ( $\sim 8 \times 5 \text{m}^2$ ) üzerindeki nesnelerin X3D dosya biçiminde 3B nokta bulutu ile nesnelerin konumlarının karşılaştırması Şekil 5.9'da sunuldu.



Şekil 5.7. Uzak-yerel 3B Nokta Bulut Haritası Görüntüleme Arayüzü

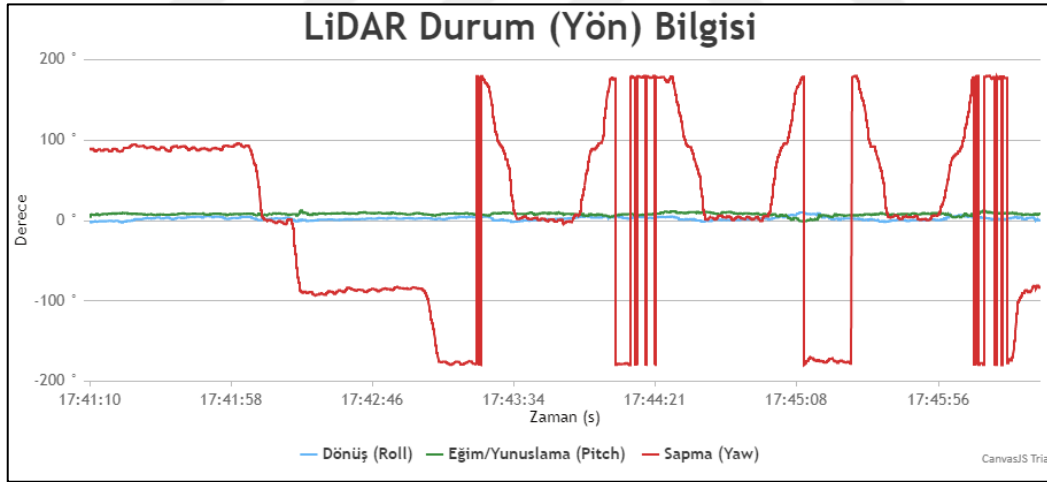


Şekil 5.8. Zamana göre veri akış grafikleri



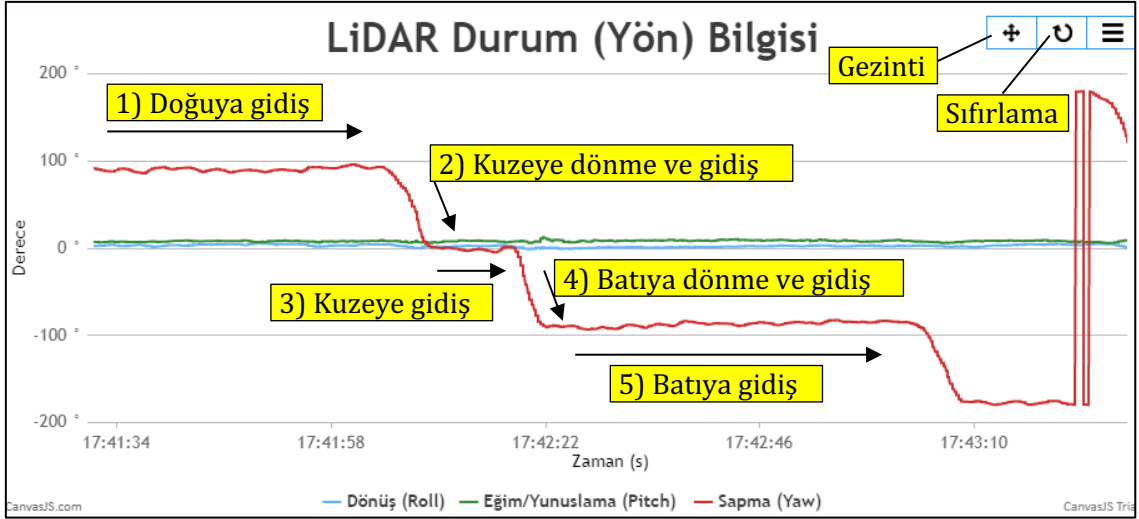
Şekil 5.9. MySQL veri tabanına kayıt edilmiş veriler ile 3B nokta bulutu harita görüntüleme web arayüzü

Şekil 5.8’de ilgili deneysel çalışma için verilen zamana göre veri akış grafiklerinden “LiDAR Durum (Yön) Bilgisi” grafiği, zamana göre anlık platformun uçuş davranış/durum (attitude) yani yön bilgisini içermektedir (Şekil 5.10).



Şekil 5.10. Platformun zamana göre anlık yunuslama (pitch), yuvarlanma/yalpa (roll) ve sapma/dönme (yaw) verileri

Veri akış arayüzünde ilgili grafiklerde seçilen bölgeler daha ayrıntılı incelenebilir. Şekil 5.11’de platformun uçuş davranış/durum grafiğinde seçilen bölge daha ayrıntılı olarak gösterildi. Şekil 5.11’de görüldüğü gibi GNSS ve IMU’dan alınan yön bilgisi anlık olarak izlendi. Burada sırası ile “Doğuya gidiş ( $\sim 90^\circ$ )”, “Kuzeye dönme ve gidiş ( $\sim 90^\circ - 0^\circ$ )”, “Kuzeye gidiş ( $\sim 0^\circ$ )”, “Batıya dönme ve gidiş ( $\sim 0^\circ - (\sim 90^\circ)$ )” ve “Batıya gidiş ( $\sim 90^\circ$ )” şeklinde değişik yönlerde tarama yapıldı.



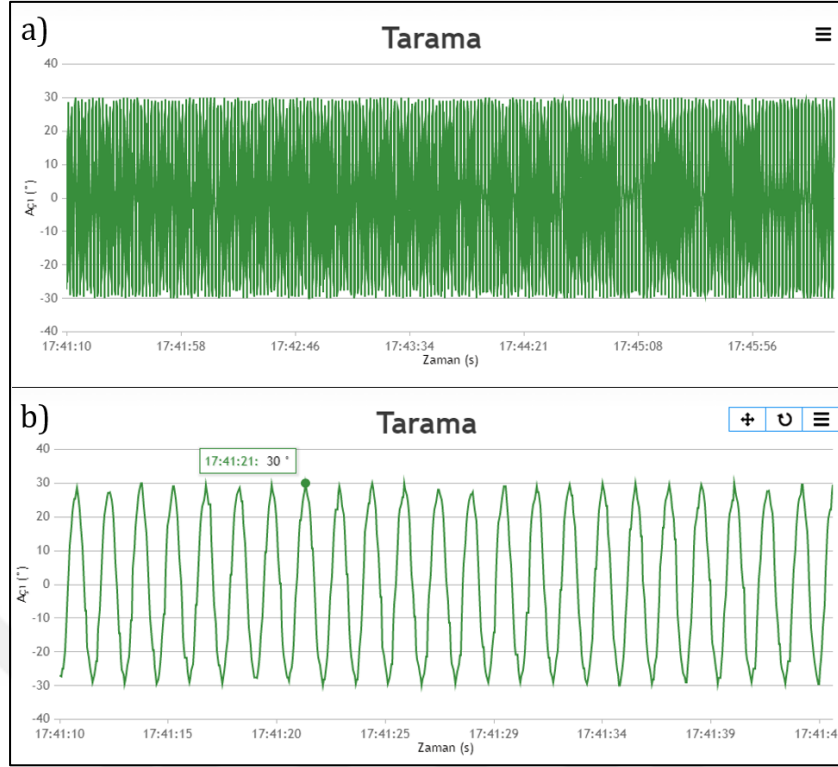
Şekil 5.11. Platformun zamana göre anlık yunuslama (pitch), yuvarlanma/yalpa (roll) ve sapma/dönme (yaw) verilerinde seçilen bölgenin ayrıntılı görünümü

Şekil 5.12a'da lazer tarayıcının görüş alanının (FOV: Field of View) yaklaşık 60° de çalıştığının kontrolünün izlendiği grafik ve Şekil 5.12b'de ise grafikte seçilen bölgenin daha ayrıntılı gösterimi yer almaktadır. Şekil 5.12'de görüldüğü gibi tüm deney süresince lazer tarayıcının görüş alanı sabit kalmaktadır.

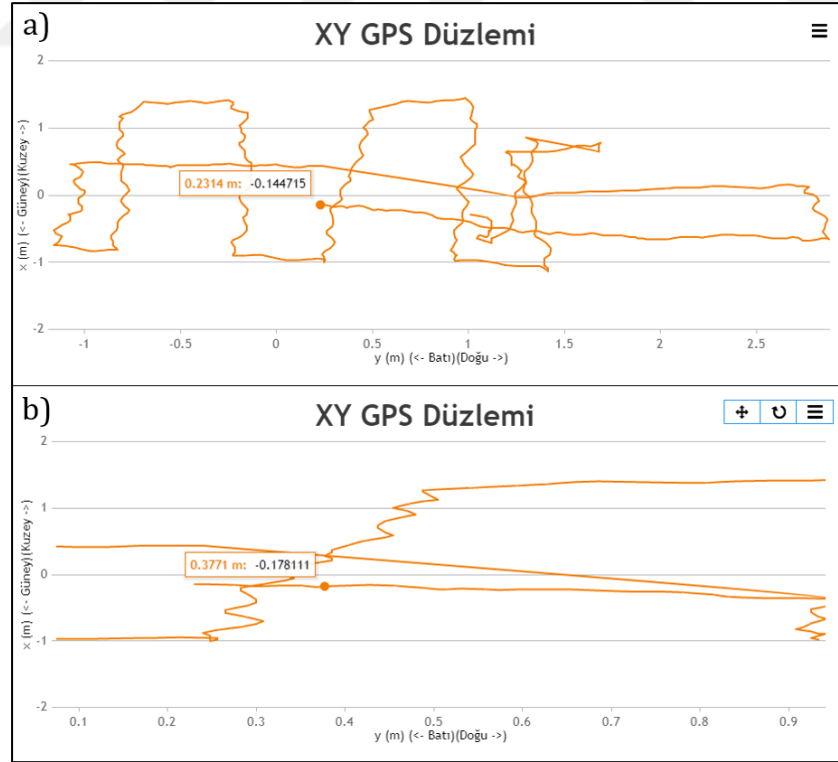
Şekil 5.13a'da XY düzleminde konum bilgisinin deney süresince grafiği ve Şekil 5.13b'de ise grafikte seçilen bölgenin daha ayrıntılı gösterimi yer almaktadır. Bütün yönler Şekil 5.10 ve Şekil 5.11 ile ilişkilidir.

Şekil 5.14a'da tarama esnasında X3D dosya formatına uygun x-ekseni boyunca ilerlemenin (z-eksenine paralel tarama) ve x-eksenine dik taramanın (z-eksenine dik tarama) izlendiği grafik verilmektedir. Şekil 5.14b'de ise grafikte seçilen bölgenin daha ayrıntılı gösterimi yer almaktadır. Şekil 5.15a'da tarama esnasında X3D dosya formatına uygun y-ekseni yani taranan yüzeyin yükseklik bilgisinin izlendiği grafik verilmektedir. Şekil 5.15b'de ise grafikte seçilen bölgenin daha ayrıntılı gösterimi yer almaktadır. Şekil 5.16a'da tarama esnasında X3D dosya formatına uygun z-ekseni boyunca ilerlemenin (x-eksenine paralel tarama) ve z-eksenine dik taramanın (x-eksenine dik tarama) izlendiği grafik verilmektedir. Şekil 5.16b'de ise grafikte seçilen bölgenin daha ayrıntılı gösterimi yer almaktadır.

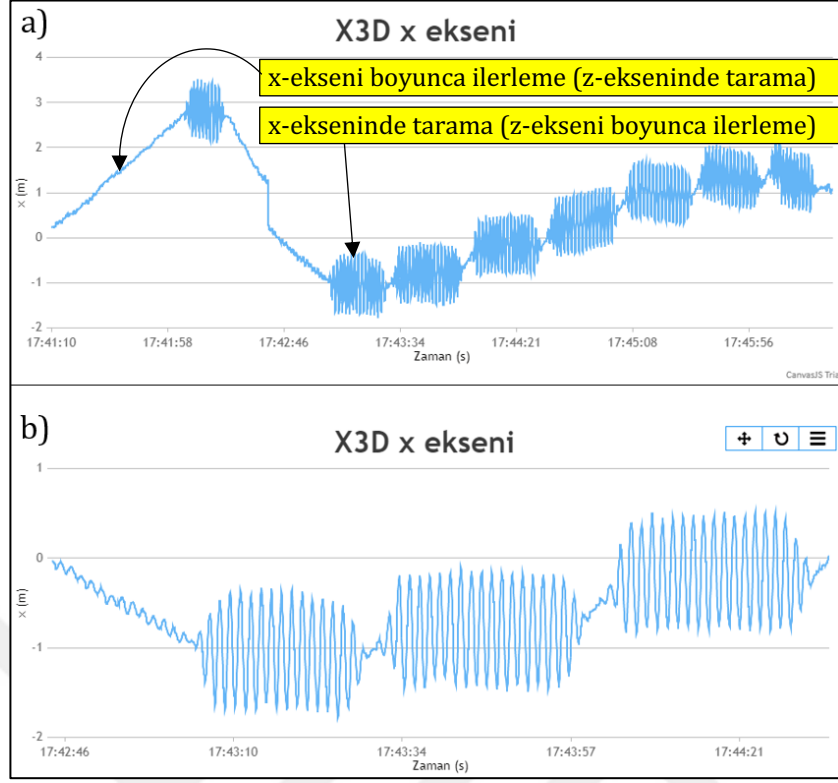
Gerçek nesnelerin X3D sahnesinde farklı zaman aralıklarında taranan yüzeydeki görünümü Şekil 5.17'de verildi.



Şekil 5.12. Lazer tarayıcının görüş alanının (FOV: Field of View) yaklaşık 60° de çalışırken a) tüm deney süresince ve b) seçilen bölgenin daha ayrıntılı gösterimi



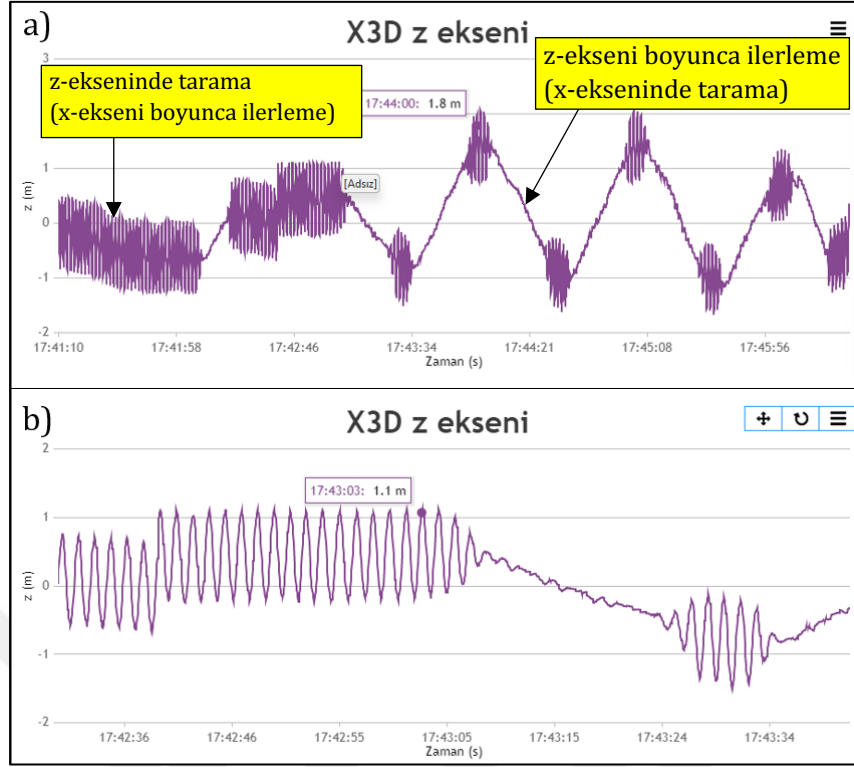
Şekil 5.13. XY düzleminde konum bilgisinin a) deney süresince grafiğinin gösterimi ve b) seçilen bölgenin daha ayrıntılı gösterimi



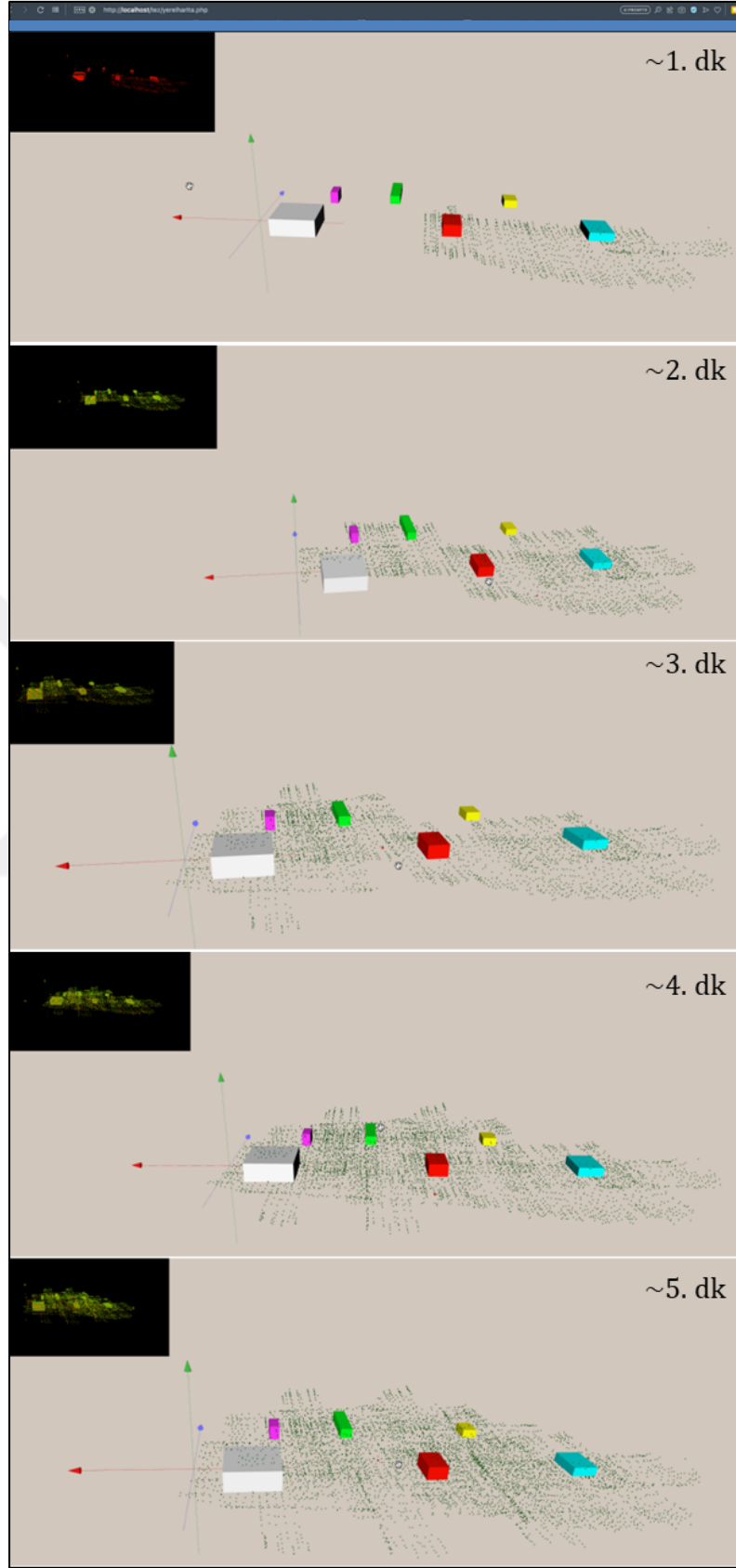
Şekil 5.14. Deney süresince X3D dosya formatına uygun a) x-ekseni boyunca ilerleme ve tarama grafiğinin gösterimi, b) seçilen bölgenin daha ayrıntılı gösterimi



Şekil 5.15. Deney süresince X3D dosya formatına uygun a) yüzeyin yükseklik bilgisinin izlendiği grafiğin ve b) seçilen bölgenin daha ayrıntılı gösterimi



Şekil 5.16. Deney süresince X3D dosya formatına uygun a) z-ekseni boyunca ilerleme ve tarama grafiğinin gösterimi, b) seçilen bölgenin daha ayrıntılı gösterimi



Şekil 5.17. Farklı zaman dilimlerinde taranan yüzey ve nesnelerin X3D sahnesinde görünümü

### 5.3. Değerlendirme

Bu tez çalışmasının ikinci uygulama aşamasında, Platformdan Bağımsız Web Tabanlı Gerçek Zamanlı LiDAR Haritalama Sistemi gerçek ortam bileşenlerine uygun bir sisteme uyarlandı. Oluşturulan sistem elle taşınabilir, platformdan bağımsız ve konum bilgisi GNSS uydularından elde edilen bir deney sistemidir. Elle taşıma yöntemi ile dış ortamda hareket ettirilen platformun ardışık konumlarından yere olan mesafeler bir dizi tarama yapılarak ölçüldü. Elle taşınabilir platformun konum ve davranış (attitude) bilgisi, dış ortamda ve geniş alanlarda kullanımından dolayı uçuş kontrol kartında tümlşik olan GNSS ve IMU modüllerinden elde edildi. Sistemin her uçuş sistemine uyarlanabilirliğini kanıtlamak amacıyla iki ayrı uçuş kontrol kartı kullanıldı. Yapılan deneysel çalışmada sistemin farklı uçuş kontrol kartlarına uyarlanabilirliğinde başarılı olduğu gözlemlendi. Elle taşıma sistemi yeterince yüksekten taşınmadığından dolayı duvar gibi yüzeylerden GNSS konum bilgisinde sapmalar yaşandı. Bu konum sapmalarını IMU'dan alınan hız bilgisi verileriyle düzeltildi. Bu tarama işleminde doğrusal hareket olmadığından dolayı küresel koordinat sistemine uygun denklemler kullanılarak veri elde etme sürecinde her nokta için  $x_n$ ,  $y_n$  koordinatları ve  $z_n$  değerleri elde edildi. Böylelikle sistem genel olarak evrensel bir forma dönüşmüş oldu. Elde edilen veriler anlık ve eşzamanlı olarak MySQL veri tabanına kaydedildi. Geliştirilen kullanıcı dostu web arayüzünde, HTML5 ve X3D dosya formatı kullanılarak anlık 3B görselleştirme yapıldı. Geliştirilen web arayüzünde veri akış ve 3B nokta bulutu görüntüleme ekranları ile sistemin bütün davranışı anlık olarak izlenebilmektedir. Geliştirilen yöntemin uygulaması olan bu elle taşınabilir platform sistemiyle uçuş öncesi ve uçuş sonrası veri işleme süreçlerinde zaman kazanıldığı gözlemlendi. Genel olarak platformdan bağımsız bu sistemle, 3B nokta bulutu üretilir ve veriler daha sonra analiz edilmek üzere bir veri tabanında saklanarak uzak kullanıcıların kullanımına sunulmaktadır.

## 6. İHA PLATFORMUNDA LiDAR HARİTALAMA

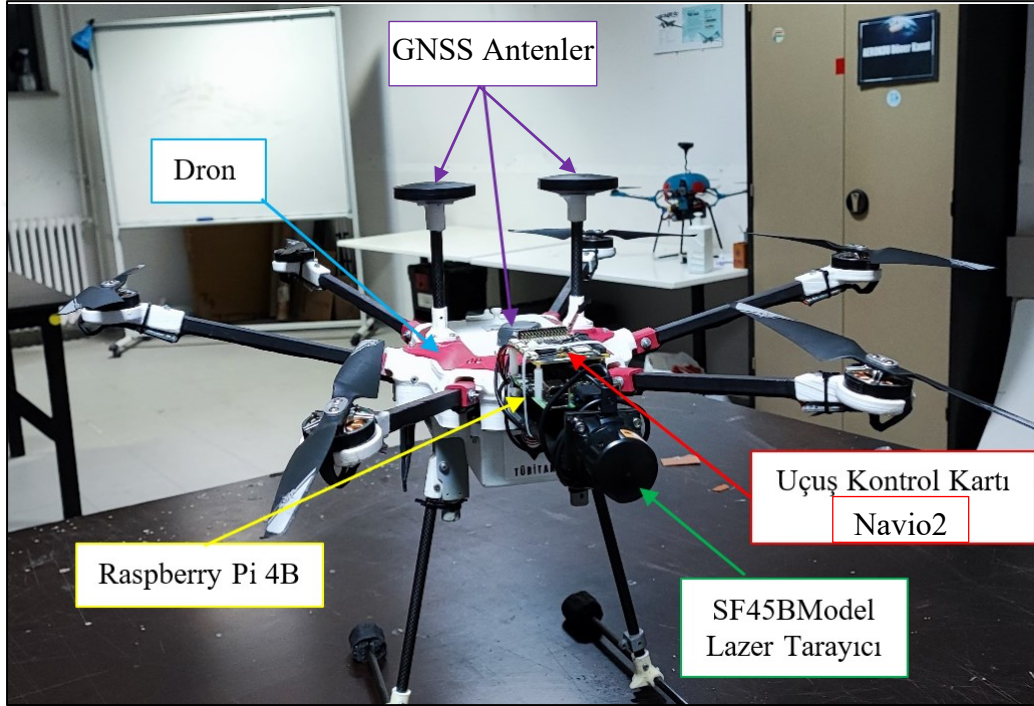
Önceki bölümde elle taşınabilir platform özellikte genişletilen Platformdan Bağımsız Web Tabanlı Gerçek Zamanlı LiDAR Haritalama sistemi, gerçek sistemlerde kullanılan tüm sensörlerden gelen verileri test etmek için alçak irtifalı bir platform özellikte genişletildi. Bu bölümde ise hem laboratuvar ortamında simüle edilen hem de elle yeryüzünde taşınabilir yani platformdan bağımsız ve gerçek ortam bileşenlerine uyarlanabilen bu sistem, uzaktan algılama platformu olarak alçak irtifalı bir platforma (alçak irtifalı İHA) uyarlanabilecek özellikte genişletildi. Bu bölümde alçak irtifada uçabilen dron tarafından taşınabilen lazerle tarama deney sistemi ve bileşenleri verilmiştir. Deney sistemi ile elde edilen LiDAR verileri ve oluşturulan gerçek zamanlı 3B haritalama sonuçları sunulmuştur.

### 6.1. Deneysel Sistem

Bu tez çalışmasının son uygulama aşamasında, “Platformdan Bağımsız Web Tabanlı Gerçek Zamanlı LiDAR Haritalama Sistemi” yöntemini alçak irtifalı araçlarda (İHA, dron vb.) uçuş yapabilen ortamlar için ortaya koymak amacıyla gerçek ortam bileşenlerine uyarlanabilen bir deney sistemi oluşturuldu. Şekil 6.1’de gösterildiği gibi, gerçek zamanlı tarama işlemleri için alçak irtifa uzaktan algılama platformu olarak dron (alçak irtifa İHA) ile taşıma yöntemi kullanıldı. Kullanılan hegzakopter dron yaklaşık 800 gr yük taşıma, yüke bağlı olarak 20-25 dk uçuş süresine ve istenildiğinde otonom uçuş özelliklerine sahiptir. Uzaktan kumanda ile kontrol edilerek alçak irtifada hareket eden platformun ardışık konumlarından yere olan mesafeler bir dizi tarama yapılarak ölçüldü.

Hem laboratuvar ortamında simüle edilen sistemde hem de elle yeryüzünde taşınabilir sistemde olduğu gibi bu deneysel çalışmada da SF45B model lazer tarayıcı yere bakacak şekilde görüş alanı (FOV: Field of View) yaklaşık 60° ye ayarlandı. Sistemin konum ve davranış (attitude) bilgisi, dronun uçuş sistemindeki Pixhawk Cube uçuş kontrol kartında bağımsız olarak teknik özellikleri önceki bölümde verilen Raspberry Pi 4B ile tümleşik çalışabilen Navio2 uçuş kontrol kartı üzerindeki GNSS ve IMU’dan yararlanılarak elde edildi (Şekil 6.1). Uzaktan kumanda ile hareket ettirilen platformun ardışık konumlarından zemine olan mesafeleri bir dizi tarama yapılarak ölçüldü. Lazer tarayıcıdan ölçülen açı değerleri ( $\theta_n$ ) ve mesafe değerleri (hipotenüs =  $r_n$ ) kullanılarak

dik üçgenin düşey kenar uzaklıkları Tablo 5.2’deki denklemlerden hesaplanarak veri elde etme sürecinde her nokta için  $x_n$ ,  $y_n$  koordinatları ve  $z_n$  değerleri elde edildi. Burada herhangi bir n noktası için platformun GNSS sistemine göre x, y konum bilgisi ( $k_x, k_y$ ) ve IMU’dan alınan hız bilgisi ( $\vartheta_x, \vartheta_y, \vartheta_z$ ) ile konum doğruluğu sağlandı. Ayrıca platformun yunuslama (pitch), yuvarlanma/yalpa (roll), sapma/dönme (yaw) hareketleri de kayıt edilerek ilgili hesaplamalara dahil edildi.



Şekil 6.1. Alçak irtifa İHA platformu ile platformdan bağımsız LiDAR sisteminin birlikte görünümü

Alçak irtifada uçabilen dron tarafından taşınabilen platform bağımsız LiDAR sisteminin kullanıldığı ortam Şekil 6.2’de verildi. Yer yer nesnelerin (uçaklar) yüksekliği 2m’yi aşan ve yaklaşık 24x24m<sup>2</sup> lik bir alan tarandı.



Şekil 6.2. Alçak irtifada uçabilen dron tarafından taşınabilen taşınabilir platform bağımsız LiDAR sistemi için deneysel çalışma alanına genel bakış (~24x24m<sup>2</sup>)

## 6.2. İHA Platformunda LiDAR Veri İşleme ve Gerçek Zamanlı Haritalama

Veri alma ve görselleştirme algoritması, elle taşınabilir platform bağımsız LiDAR sistemindeki algoritmanın aynısı olup şematik olarak Şekil 5.4'te verildi. Python kodlarının derlendiği Raspberry Pi 4B'de, sensörlerden (Lazer tarayıcı, GNSS ve IMU) gelen tüm veriler anlık ve eşzamanlı olarak üzerindeki MySQL veri tabanına kaydedildi. Elle taşıma platformunda olduğu gibi hem SF45B lazer tarayıcının hem de Navio2/Pixhawk Cube uçuş kontrol kartlarının ArduPilot ve Raspberry Pi entegrasyonu olduğu için Python derlemesi tercih edildi. Raspberry Pi 4B'nin, Wifi modülü ile mobil modem (cep telefonu) ortak internet ağı üzerinden güvenli uzaktan oturum açma yöntemi olan SSH protokolü kullanılarak Yer Kontrol ve Kayıt İstasyonu olarak tanımlanan başka bir bilgisayarla bağlantısı kuruldu. Bu bağlantı ile Raspberry Pi 4B üzerinde çalışan MySQL veri tabanından elde edilen anlık verilere, Yer Kontrol ve Kayıt İstasyonu üzerinde geliştirilen web arayüzü üzerinden yine anlık kablosuz uzaktan erişim sağlanarak gerçek zamanlı 3 boyutlu nokta bulutu elde edildi. Navio2/Pixhawk Cube uçuş kontrol kartlarından alınan GNSS, IMU bilgilerinden faydalanılarak GNSS sistemine göre xy düzlemi boyunca (x-kuzey, y-doğu) tarama işlemi gerçekleştirildi. Bütün bu süreçler elle taşınabilir platformda LiDAR veri işleme süreçlerine benzer süreçler gerçekleştirildi.

Bu deneysel çalışmada dron ile yaklaşık 10 dakikalık uçuşta toplam 12.149 adet 3B nokta koordinatı (x, y, z) elde edilen tarama verilerinin MySQL arayüzünde gösterimi Şekil 6.3'te verildi. Elle taşınabilir platform sisteminde kullanılan web arayüzü bu sistemde sorunsuz kullanıldı. Veriler, veri tabanından PHP programlama dili ve jQuery betik dili kullanılarak X3D etiketlerinden `<PointSet><Coordinate point="x, y, z" /></PointSet>` etiketinde "point" parametresine çekildi. Lazer tarayıcı ve diğer sensörlerden alınan veriler ile ölçülen her bir nokta için yaklaşık 10 dakikalık uçuşta x, y koordinat ve z değeri bilgisi elde edildi. Bu süre zarfında 12.149 adet x, y koordinatları ve z değerleri için anlık 3 boyutlu görselleştirme yapıldı. Bu veri elde etme ve görselleştirme süreci Şekil 5.3'te verilen 6, 8, 9, 10 döngülerinin eşzamanlı bir şekilde çalışması ile gerçekleşti. Bu süreçte de 3B görselleştirme işlemi Yer Kontrol ve Kayıt İstasyonunda yapıldığından dolayı Uzaktan Algılama Platformundaki (İnsansız Hava Aracı) yük azalmıştır. Önceki deneysel çalışmalar için geliştirilen web arayüzü, bu

sistemde de hiçbir değişiklik yapılmaksızın kullanıldı. İHA platformu kullanırken yapılan deneylerdeki veri akış grafikleri Şekil 6.4'te verildi.

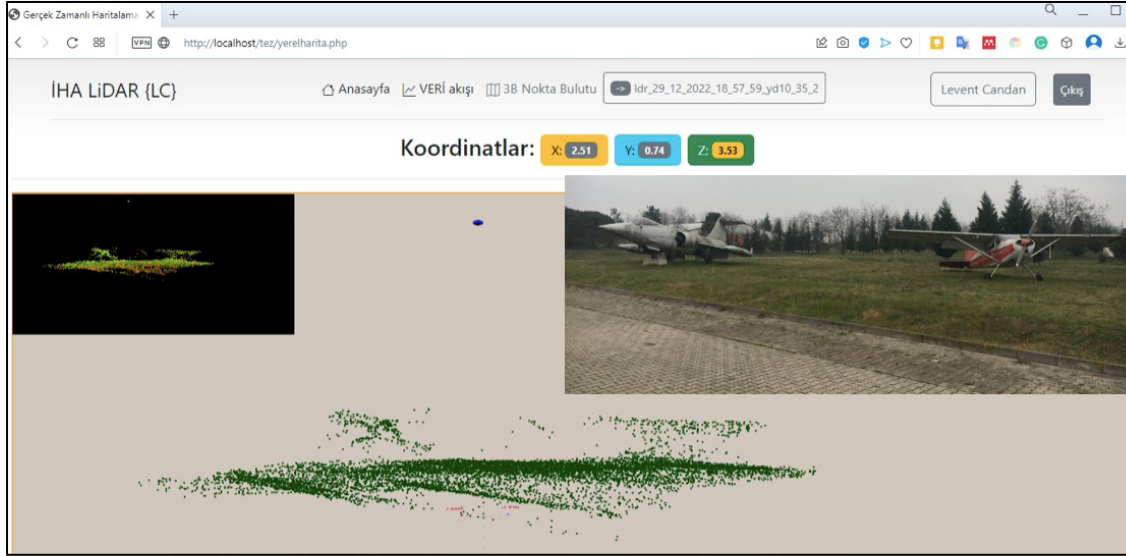
| id      | firstRow | sıcaklık | yawAngle | kart_x | kart_y   | yazılım_x | yazılım_y           | yazılım_z         | pitch               | yaw                | roll                | hız                 | ref  |
|---------|----------|----------|----------|--------|----------|-----------|---------------------|-------------------|---------------------|--------------------|---------------------|---------------------|------|
| Kopyala | 26       | 8.21     | 24.62    | -4.66  | 0.155847 | 0.0342864 | -0.6327161986846082 | 8.182860595514379 | 0.1558473002393015  | 3.1766516825035214 | -31.271130711364744 | -0.678091818306595  | 8.35 |
| Kopyala | 27       | 8.51     | 24.62    | 13.21  | 0.155847 | 0.0342864 | 1.9789983134216331  | 8.28481717337939  | 0.1558473002393015  | 3.1766516825035214 | -31.271130711364744 | -0.678091818306595  | 8.35 |
| Kopyala | 28       | 8.67     | 24.7     | 16.48  | 0.155847 | 0.0342864 | 2.493797521484228   | 8.31382613913621  | 0.1558473002393015  | 3.1766516825035214 | -31.271130711364744 | -0.678091818306595  | 8.35 |
| Kopyala | 29       | 8.09     | 24.62    | -2.85  | 0.155847 | 0.0342864 | -0.3679595088058167 | 8.07999370190948  | 0.1558473002393015  | 3.0186774613648653 | -31.50809396406412  | -0.7068170429058372 | 8.35 |
| Kopyala | 30       | 8.54     | 24.62    | -23.1  | 0.155847 | 0.0342864 | -3.316272570002789  | 7.855275587127639 | 0.1558473002393015  | 3.0186774613648653 | -31.50809396406412  | -0.7068170429058372 | 8.35 |
| Kopyala | 31       | 8.42     | 24.46    | -21.2  | 0.155847 | 0.0342864 | -3.010592474299592  | 7.850166406234613 | 0.1558473002393015  | 3.0186774613648653 | -31.50809396406412  | -0.7068170429058372 | 8.35 |
| Kopyala | 32       | 7.95     | 24.7     | -1.4   | 0.155847 | 0.0342864 | -0.1599494105219672 | 7.947626843760406 | 0.1558473002393015  | 3.0186774613648653 | -31.50809396406412  | -0.7068170429058372 | 8.35 |
| Kopyala | 33       | 8.42     | 24.54    | 16.81  | 0.189243 | 0.0171432 | 2.4521977414569305  | 8.060205294794475 | 0.18924315062956865 | 1.287337546318397  | -31.26105276364088  | -0.7390911923781037 | 8.35 |
| Kopyala | 34       | 8.98     | 24.46    | 25.15  | 0.189243 | 0.0171432 | 3.8335490833293386  | 8.128680468304337 | 0.18924315062956865 | 1.287337546318397  | -31.26105276364088  | -0.7390911923781037 | 8.35 |
| Kopyala | 35       | 7.92     | 24.78    | 5.68   | 0.189243 | 0.0171432 | 0.8010046408418472  | 7.88111421491717  | 0.18924315062956865 | 1.287337546318397  | -31.26105276364088  | -0.7390911923781037 | 8.35 |

Şekil 6.3. Yaklaşık 10 dakikalık uçuş süresince alınmış 12.149 LiDAR verisinin MySQL veri tabanında verilerin görünümü



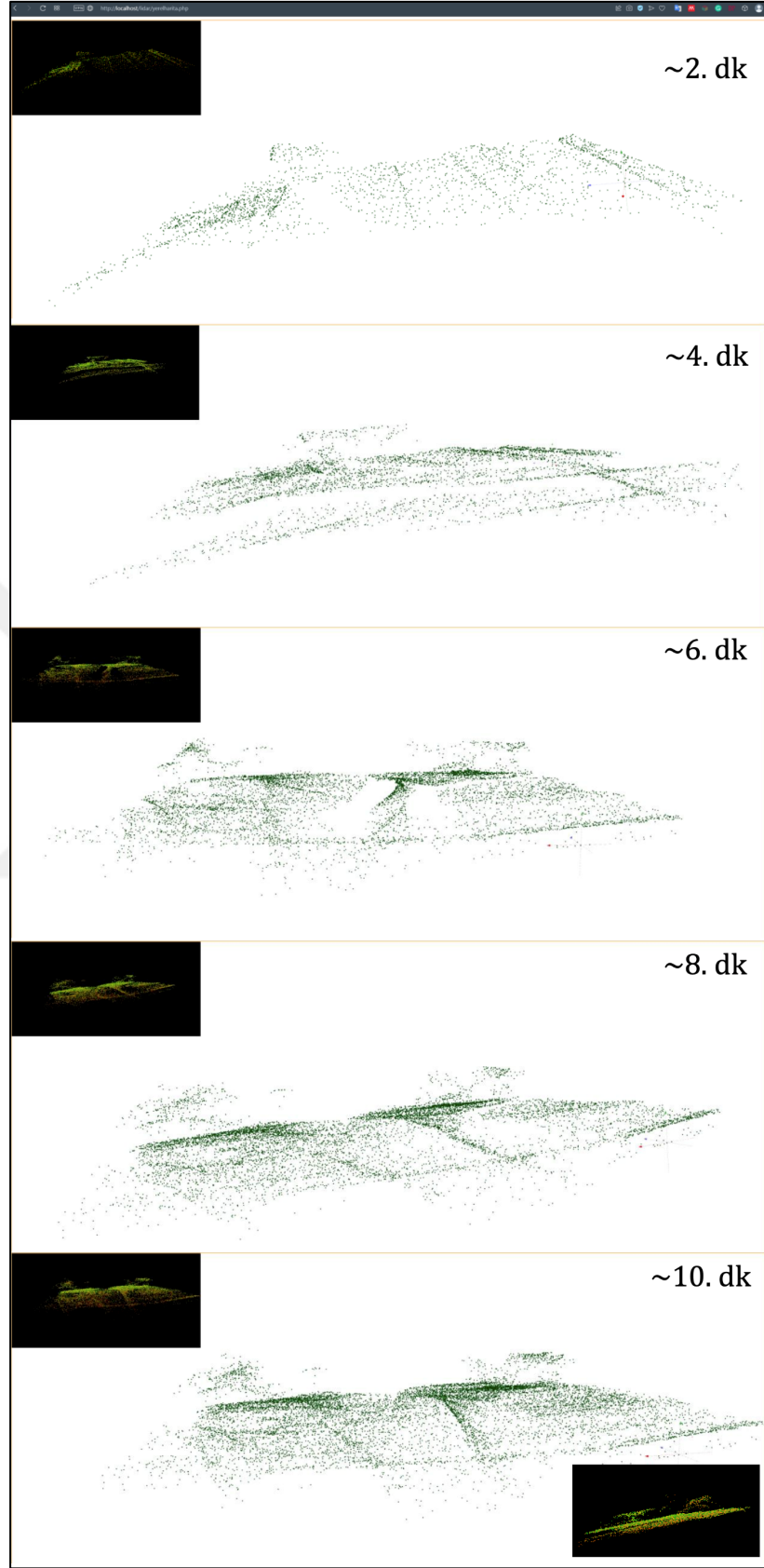
Şekil 6.4. Zamana göre veri akış grafikleri

Taranan yüzeyin ( $\sim 24 \times 24 \text{m}^2$ ) üzerindeki nesnelerin X3D dosya biçiminde 3B nokta bulutu ile nesnelerin konumlarının karşılaştırması Şekil 6.5'te sunuldu.



Şekil 6.5. 3B nokta bulutunun elde edilmesi. Sol üst köşede görüntünün negatif görünümü, sağ üst köşede taraması yapılan bölgenin fotoğrafı görünmektedir

Alınan verilerin X3D sahnesinde farklı zaman aralıklarında taranan yüzeyin 3B nokta bulutu görünümü Şekil 6.6'de verildi. Yapılan bu deneysel çalışmanın, Bölüm 4'te ayrıntıları verilen ve laboratuvar ortamında yapılan çalışmayla kıyaslandığında veri sıklığı bakımından iyi bir 3B görselleştirme sağlanamadı gözlemlendi. Bunun başlıca sebebi, laboratuvar ortamından oldukça geniş olan tarama alanında lazer tarayıcının veri alma/okuma sıklığının profesyonel LiDAR sistemlerinden daha düşük olduğudur. Uçuş yüksekliği hem laboratuvar ortamında hem de elle taşıma deneysel çalışmalarından yaklaşık 8 kat yükseklikte (8.35m) tarama gerçekleştiğinden, aynı tarama hızında tarama alanında ölçülen 3B noktaların birbirinden uzaklaştığı gözlemlendi. Bu farklılığa uçuş kontrol kartlarından alınan konum bilgisinin yenilenme (gecikme) süresinden ve GNSS hassasiyetinin  $\sim 50$  cm olmasından katkı sağlamıştır. Tarama ve Konum bilgisi eş zamanlı alındığından dolayı konum bilgisinin geç elde edilmesi, ilerleme hızının yanında nispeten yavaş kaldığından dolayı, 3B nokta bulutu gösteriminde nesnelerin (uçakların) ayrıntılarının azaldığı ifade edilebilir. Bu durum ayrıca dış ortamdaki tarama ortamına göre nispeten küçük olan nesnelerin 3B görselinde pek görünmemesine neden olmuştur. Ayrıca deneysel çalışmanın yapıldığı ortamda, 15-20 cm uzunluğundaki ıslak çimden oluşan bir zeminde olmasına rağmen yüzey yükseltileri belirgin olarak görülmektedir.



Şekil 6.6. Farklı zaman dilimlerinde taranan yüzeyin X3D sahnesinde görünümü

Başka bir deneysel çalışmada dron ile yaklaşık 3 dakikalık uçuşta toplam 3989 adet 3B nokta koordinatı (x, y, z) elde edilen tarama verilerinin MySQL arayüzünde gösterimi Şekil 6.7’de verildi. Geliştirilen web arayüzü bu sistemde de sorunsuz kullanıldı.

Veriler, veri tabanından PHP programlama dili ve jQuery betik dili kullanılarak X3D etiketlerinden <PointSet><Coordinate point="x, y, z" /><PointSet/> etiketinde “point” parametresine çekildi.

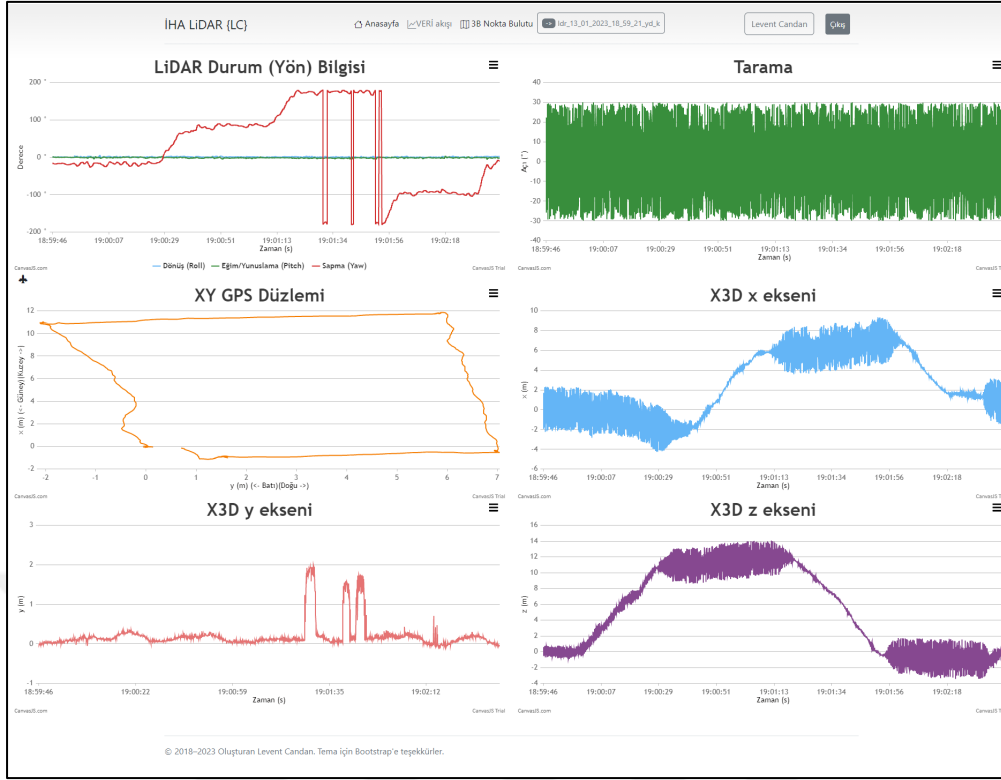
Lazer tarayıcı ve diğer sensörlerden alınan veriler ile ölçülen her bir nokta için yaklaşık 3 dakikalık uçuşta x, y koordinat ve z değeri bilgisi elde edildi. Bu süre zarfında 3989 adet x, y koordinatları ve z değerleri için anlık 3 boyutlu görselleştirme yapıldı. Bu veri elde etme ve görselleştirme süreci Şekil 5.3’te verilen 6, 8, 9, 10 döngülerinin eşzamanlı bir şekilde çalışması ile gerçekleşti.

| id    | firstRow | sıcaklik | yawAngle | kart_x    | kart_y    | yazilim_x         | yazilim_y          | yazilim_z         | pitch              | yaw                 | roll               | hiz_x | hiz_y | hiz_z | ref | konum | zama             |
|-------|----------|----------|----------|-----------|-----------|-------------------|--------------------|-------------------|--------------------|---------------------|--------------------|-------|-------|-------|-----|-------|------------------|
| Sil 1 | 4.34     | 22.76    | 14.01    | 0.0222639 | 0.0085716 | 1.0193229469189   | -0.010900138621574 | 0.30914572394765  | 0.2861708879219368 | -15.845520323199034 | 1.5315716447107495 | 0.05  | 0.04  | -0.02 | 4.2 | NULL  | 2023-01-13 18:59 |
| Sil 2 | 4.22     | 22.76    | -1.61    | 0.0222639 | 0.0085716 | -0.1054885828583  | -0.018334056126091 | -0.01010983207361 | 0.2861708879219368 | -15.845520323199034 | 1.5315716447107495 | 0.05  | 0.04  | -0.02 | 4.2 | NULL  | 2023-01-13 18:59 |
| Sil 3 | 4.52     | 22.76    | -21.07   | 0.0222639 | 0.0085716 | -1.5546582452084  | -0.017801391695443 | -0.42142804323595 | 0.2861708879219368 | -15.845520323199034 | 1.5315716447107495 | 0.05  | 0.04  | -0.02 | 4.2 | NULL  | 2023-01-13 18:59 |
| Sil 4 | 4.68     | 22.76    | -25.81   | 0.0222639 | 0.0085716 | -1.9516179022406  | -0.013136283094576 | -0.53409720839726 | 0.2861708879219368 | -15.845520323199034 | 1.5315716447107495 | 0.05  | 0.04  | -0.02 | 4.2 | NULL  | 2023-01-13 18:59 |
| Sil 5 | 4.3      | 22.84    | -9.72    | 0.0222639 | 0.0085716 | -0.68982555338251 | -0.038271759140692 | -0.17596235001983 | 0.2861708879219368 | -15.845520323199034 | 1.5315716447107495 | 0.05  | 0.04  | -0.02 | 4.2 | NULL  | 2023-01-13 18:59 |
| Sil 6 | 4.24     | 22.84    | 5.89     | 0.0222639 | 0.0085716 | 0.42714232337314  | -0.017615948831875 | 0.14106693987565  | 0.2861708879219368 | -15.845520323199034 | 1.5315716447107495 | 0.05  | 0.04  | -0.02 | 4.2 | NULL  | 2023-01-13 18:59 |
| Sil 7 | 4.57     | 22.84    | 21.98    | 0.0222639 | 0.0085716 | 1.6455301381295   | -0.037827541238026 | 0.51833355601567  | 1.1563277477256955 | -16.859090022593737 | 0.670253106214106  | 0.02  | 0.05  | 0     | 4.2 | NULL  | 2023-01-13 18:59 |

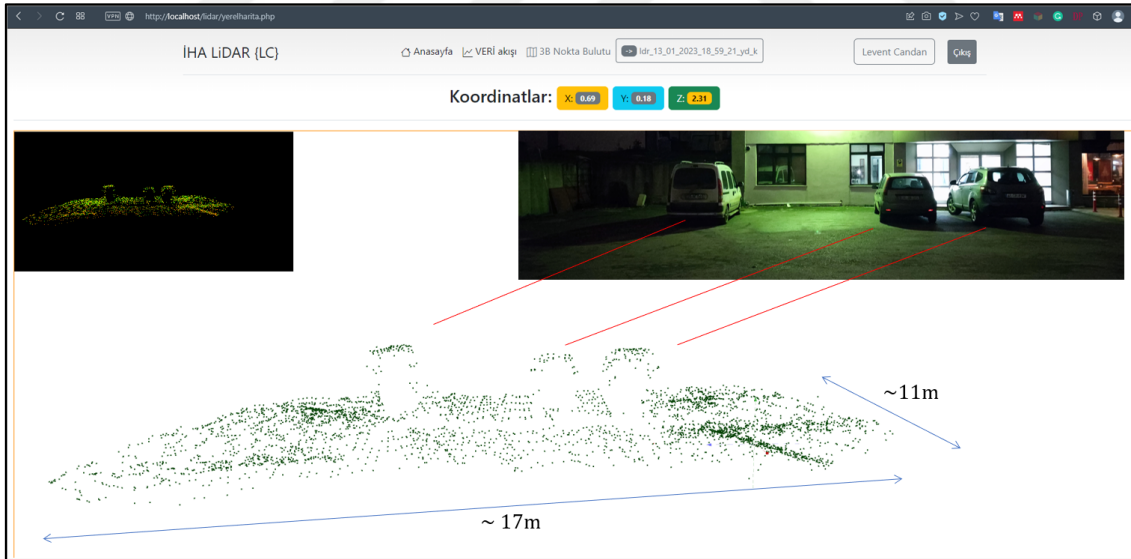
Şekil 6.7. Yaklaşık 3 dakikalık uçuş süresince alınmış 3989 LiDAR verisinin MySQL veri tabanında verilerin görünümü

İHA platformu (dron) kullanırken yapılan deneyde elde edilen veri akış grafikleri Şekil 6.8’te verildi. Taranan yüzeyin ( $\sim 11 \times 17 \text{ m}^2$ ) üzerindeki nesnelerin X3D dosya biçiminde 3B nokta bulutu ile nesnelerin konumlarının karşılaştırması Şekil 6.9’da sunuldu.

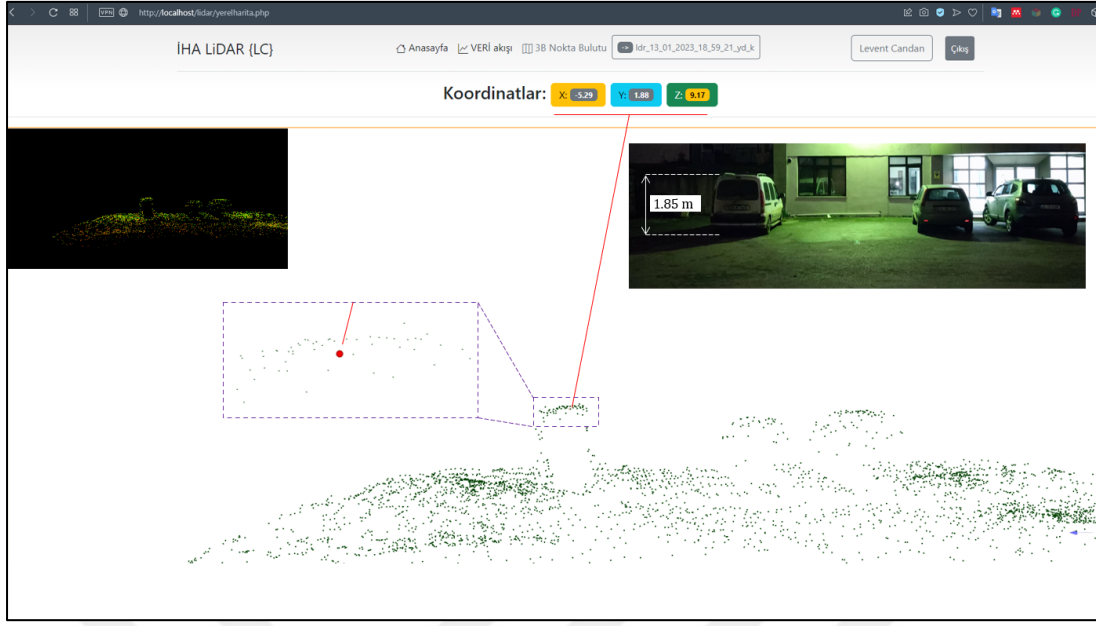
Şekil 6.10’da alınan verilerin X3D sahnesinde araçların gerçek boyutuyla karşılaştırma yapıldı. Karşılaştırmada X3D sahnesindeki koordinat sisteminde aracın yüksekliği ortalama 1.88 m olarak görüldü. Yine Şekil 6.10’da sağ üst köşede aracın fabrika verisine göre yüksekliği 1.85 m olarak gösterildi. Ortalama  $\pm 3 \text{ cm}$ ’lik bir değişim gözlemlendi. Ölçümlerin kullanılan lazer tarayıcının doğruluk değerleri içerisinde olduğu görüldü.



Şekil 6.8. Yaklaşık 3 dakikalık deneysel çalışmanın zamana göre veri akış grafikleri



Şekil 6.9. 3B nokta bulutunun elde edilmesi. Sol üst köşede görüntünün negatif görünümü, sağ üst köşede taraması yapılan bölgenin fotoğrafı görünmektedir



Şekil 6.10. X3D sahnesinde araçların gerçek boyutuyla karşılaştırma

### 6.3. Değerlendirme

Bu tez çalışmasının üçüncü ve son uygulama aşamasında Platformdan Bağımsız Web Tabanlı Gerçek Zamanlı LiDAR Haritalama Sistemi yöntemini alçak irtifalı (İHA, dron vb.) uçuş yapabilen ortamlar için ortaya koymak amacıyla gerçek ortam bileşenlerine uyarlanabilen bir deney sistemi oluşturuldu. Geliştirilen yöntemin tam uygulaması olan bu sistem, uçuş öncesi ve uçuş sonrası veri işleme süreçlerini kısaltmaktadır. Ayrıca bu Platformdan Bağımsız Web Tabanlı Gerçek Zamanlı LiDAR Haritalama Sistemi ile anlık olarak veriler elde edilmekte, bu sayede söz konusu alandaki değişim tespit edilebileceği ve sorunlara hızlı çözümler üretilebileceği öngörülmektedir. Yapılan deneysel çalışmada sistemin farklı uçuş kontrol kartlarına ve farklı platformlara uyarlanabilirliğinde başarılı olduğu gözlemlendi. Ayrıca alçak irtifalı bu platformdan, 3B nokta bulutu üretilir ve veriler daha sonra analiz edilmek üzere bir veri tabanında saklanır. Bu veri tabanında kayıt edilen verilerin yerel bir bilgisayara yerine bir bulut sistemine doğrudan kayıt edilmesiyle anlık olarak farklı kullanıcıların kullanımına sunulabilir.

## 7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

LiDAR verilerinin doğru ve zamanında elde edilebilirliği/kullanılabilirliği, çevresel değişimin izlenmesi ve afet sonrası acil durum müdahalesi gibi durumlarda hayati önem taşımaktadır. Yaşanan/yaşanacak olan afet anı ve sonrası için uzun süren LiDAR veri işleme süreçleri acil durum müdahalelerinde önemli bir sorun olmaktadır. LiDAR verileri işleme süreçlerine uçuşların sistematik olmayışından kaynaklı, düzenli yörünge belirleme ve uçuş planlama gibi etkenlerde eklendiğinde sorun daha da büyümektedir. Ayrıca LiDAR verilerinin anlık görselleştirilememesi, tarama yapılan bölgede çeşitli koşullardan dolayı veri alınamamış ve/veya eksik veri alınmış olması durumlarıyla karşılaşılabilir. Bu tez çalışmasında, özel durumda İHA-LiDAR, genel durumda ise Platformdan Bağımsız Web Tabanlı Gerçek Zamanlı LiDAR Haritalama Sistemi tasarlandı ve gerçekleştirildi. Temel motivasyonumuz; Alçak irtifalı İHA-LiDAR'ın uzun süreli uçuş planlama, otopilot sistemleri, düzenli yörünge belirleme gibi uçuş öncesi ve veri işleme gibi uçuş sonrası süreçlerinden kaynaklanan problemlerin çözümüne katkı sağlamaktır.

Geliştirilen Platformdan Bağımsız Web Tabanlı Gerçek Zamanlı LiDAR Haritalama Sistemi hem laboratuvar ortamında hem de gerçek ortamda deneysel süreçlerle geliştirilmiştir. Gerçek zamanlı 3B nokta bulutu elde etme sürecinde, anlık (canlı) veri akışı sağlayacak taşıma platformundan (uzaktan algılama platformu) bağımsız çalışabilen web tabanlı alçak irtifa İHA-LiDAR sistemi tasarlandı. Tasarlanan Platformdan Bağımsız Web Tabanlı Gerçek Zamanlı LiDAR Haritalama Sisteminin gerçekleştirilmesi için farklı platformlara uygun deneysel sistemler geliştirildi. Geliştirilen bu yöntemde her aşama için her türlü taşıma platformu ve platforma uygun her türlü konum belirleme ekipmanı Platformdan Bağımsız Web Tabanlı Gerçek Zamanlı LiDAR Haritalama Sistemine uyarlanabilmektedir. Geliştirilen yöntemin uygulama aşamaları deneysel çalışma sırasına göre Simülasyon Platformunda LiDAR Haritalama, Elle Taşınabilir Platformda LiDAR Haritalama ve İHA Platformunda LiDAR Haritalama şeklindedir. Bu yöntemde her üç aşamada taşıma platformu ve platforma uygun konum belirleme sistemi değişiklik gösterse de veri elde etme, aktarma ve görselleştirme süreçleri sistem için temeldir. Platformdan Bağımsız Web Tabanlı Gerçek Zamanlı LiDAR Haritalama Sistemi, gerçek zamanlı verileri kendi üzerinde elde etme, kaydetme ve paylaşma özelliğine sahiptir.

Her bir aşamada Uzaktan Algılama Platformunda veri toplama süreci sırasıyla; (i) taranacak yüzeye lazer atımı gönderildi, (ii) atım yüzeyle etkileşti, (iii) atım yüzeyden geri yansıdı, (iv) lazer atımı algılandı ve (v) gerekli hesaplamalar yapılarak veri tabanına konum bilgisi ile her noktanın koordinat bilgisi (x, y, z) kayıt edilmesi şeklinde gerçekleşti. Kayıt işlemi esnasında Yer Kontrol ve Kayıt İstasyonunda bir web tarayıcı ile Uzaktan Algılama Platformuna bağlantı kurularak sırasıyla; (a) her noktanın koordinatı veri tabanından kopyalandı (b) Yer Kontrol ve Kayıt İstasyonundaki veri tabanına anlık olarak kayıt edildi ve (c) sürekli alınan veriler aynı web arayüzünde HTML + X3D etiketleri ile görselleştirilerek kullanıcıya sunuldu.

Bu tez çalışmasının uygulama aşamasında ilk olarak, “Platformdan Bağımsız Web Tabanlı Gerçek Zamanlı LiDAR Haritalama Sistemi” yöntemini ortaya koymak amacıyla herhangi bir uçuş platformu için laboratuvar ortamında gerçek ortam bileşenlerine uyarlanabilen bir simülasyon sistemi oluşturuldu. Burada gerçek zamanlı tarama işlemleri için uzaktan algılama platformu olarak sabit yükseklikteki bir kızak üzerinde sabit hızla hareket ettirilen bir platform kullanıldı. Veriler anlık, kablosuz ve uzaktan erişim ile elde edildi. Elde edilen veriler, platformdan bağımsız bir web tarayıcısında çalışabilen Web3D standardı olan XML tabanlı X3D (Extensible 3D) dosya formatı kullanılarak 3 boyutlu nokta bulutu olarak görselleştirildi. Simülasyon sisteminden elde edilen 3B nokta bulut verileri ile hedef nesnelerin boyutları arasında yapılan doğruluk karşılaştırması sonucu RMSE değeri 0,020158 m olarak hesaplandı. Elde edilen bu %2’lik doğruluğun, kullanılan lazer tarayıcının doğruluk değeri ile örtüştüğü gözlemlendi. Gerçekleştirilen bu simülasyon sistemi ile alçak irtifa İHA-LiDAR sistemi içeren sistemlere (gerçek ortamlar için) uyarlanabilir bir yöntem inşa edildi. Simülasyon sonuçları değerlendirilen bu yöntem, bu tez çalışması kapsamında elle taşınabilir platforma ve İHA platformuna uyarlandı. Veri işleme aşamalarında, her eksen için IMU’dan elde edilen ivme, yunuslama (pitch), yuvarlanma/yalpa (roll), sapma/dönme (yaw) bilgileri hesaplamalarda kullanıldı. Simülasyon sisteminde kullanılan IMU verileri ile birlikte gerçek ortama uygun konum belirleme modüllerinden alınan GNSS verileri kullanıldı. Simülasyon sisteminde doğrusal hareket olduğundan dolayı hesaplamalarda kartezyen koordinatlar kullanıldı. Gerçekte ortamlarda yapılan tarama işlemlerinde ise platformun küresel koordinat sistemine göre hareketi hesaplamalara katıldı.

Çalışmada kullanıcı dostu 3B nokta bulut haritası görüntüleme web arayüzü geliştirildi. 3B görselleştirme işlemi, Uzaktan Algılama Platformundaki (İHA) işlem yükünü azaltacak şekilde Yer Kontrol ve Kayıt İstasyonunda yapıldı. Oluşturulan web arayüzünde “Veri Akış” ekranında zamana göre istenilen tüm veri akışları ve 2 boyutlu konum bilgisi anlık (online) olarak izlenebilmektedir. Böylece haritalama işleminin yapıldığı bölgede veri alınamayan alanlar yeni bir deney planı yapmaksızın anlık olarak hızlıca tespit edilip tekrar taranabilir.

Bu çalışmanın bir diğer amacı da, LiDAR verilerine uzaktan erişim ile uzmanlar ve farklı alanlardaki bireysel araştırmacılar tarafından kolaylıkla erişilebilmesidir. Bu sistem ile verilere hızlı erişim gereken alanlarda kullanılabilecek anlık 3B nokta bulutu üretiminin yanı sıra bu veriler daha sonra analiz edilmek üzere anlık olarak MySQL veri tabanında saklanmaktadır. LiDAR verilerinin doğru ve zamanında elde edilmesinin yanı sıra, ilgili LiDAR verilerinin uzmanlar ve bireysel araştırmacılar tarafından çeşitli uygulamalar için uzaktan erişim yoluyla kolayca erişilebilir olması ve buna göre aksiyon alınabilmesi de önemlidir. Tasarlanan bu sistem, verileri tarih damgaları ile kaydederek geriye dönük araştırma veya karşılaştırma yapmada oldukça kullanışlıdır. Geliştirilen bu tasarım, verilere aynı anda birden fazla kullanıcı tarafından erişilebilmesini sağlar. Bu erişim ile kullanıcılar, veriler üzerinde istenilen veri aralığını kolayca arama, filtreleme ve hızlı bir şekilde görselleştirme olanağına sahip olurlar.

LiDAR verilerinin kullanıldığı çeşitli uygulamalarda (ormancılık, çevre vb.) doğru jeo-uzamsal bilgiler kullanılarak simülasyonların geliştirilmesi gerekmektedir. Geliştirilen yüksek çözünürlüklü simülasyonlar, bu çeşitli alanlar için bir temel platform sağlayabilen ve paylaşılabilen gerçek zamanlı bir 3B simülasyon altyapısına ihtiyaç duyar. Bu verilerin 3B ortamlarda kullanımı platformdan bağımsız web tabanlı bir altyapının sağlanması ile mümkündür. Ayrıca, bireysel araştırmacıların sahip olduğu çevrimiçi araçların çoğu, 3B nokta bulutunun yoğunluğu göz önüne alındığında, 3B sahneleri işleme konusunda sınırlıdır. İnternet dünyasının geniş kullanılabilirliği göz önüne alındığında, uzaktan algılama verilerinin web tarayıcıları aracılığıyla iletilmesi iyi bir seçimdir. Ayrıca HTML5 teknolojisi ve bulut sistemlerindeki gelişmeler Web tabanlı 3B görselleştirmeyi mümkün kılmıştır. Birden çok kullanıcının kullanımına açık olan bu altyapı, X3D öğelerinin herhangi bir HTML5 DOM ağacının parçası olarak dahil edilmesini sağlayan

X3DOM ile görselleştirilmiştir. X3DOM, genişletilebilir 3D (X3D) standardı üzerine inşa edilmiş WebGL tabanlı bir kitaplıktır ve kullanıcıların çok az bilgisayar grafiği bilgisi ile 3D sahneler oluşturmaya olanak tanır. X3D, Web3D Konsorsiyumu tarafından sürdürülen ve Uluslararası Standardizasyon Örgütü (ISO) tarafından onaylanan bir standarttır. Bu geliştirilmiş tasarım, Open Geospatial Consortium (OGC) tarafından üretilen mevcut CBS standartlarına ve World Wide Web Consortium (W3C 2004) tarafından desteklenen Web Mimarisine uyumlu bir tamamlayıcı sağlar.

Bu çalışmanın bir diğer amacı da AI ve ML tabanlı sistemler için bir altyapı sağlamaktır. Çalışmamızda kullandığımız X3D dosya formatı, AI ve ML tabanlı uygulamaların temelini oluşturmaktadır. Bu dosya formatı, ilgili kentsel nesneleri AI ve ML'ye göre tanımlamada çok başarılıdır. AI ve ML, LiDAR verilerini kullanarak 3B haritalar oluşturmak veya çevredeki nesneleri tanımlamak ve sınıflandırmak için kullanılabilir. AI ve ML, LiDAR verilerinden anlamlı bilgileri işlemek, filtrelemek ve çıkarmak için kullanıldığında LiDAR uygulamalarının doğruluğunu ve hızını artırabilir. Ayrıca AI ve ML, büyük hacimli LiDAR verilerini kullanarak ortam hakkında modelleme ve tahminde bulunmaya olanak tanır. Bu değerli bilgiler ve tahminler, kurum ve kuruluşlara doğal afetlerde karar vermede yardımcı olabilir. Bu çalışma, daha gelişmiş ve şu anda kullanımda olan telemetri ve GNSS teknolojileri ile gerçek ortamlar için kolayca genişletilebilir. Ayrıca 5G gibi hızla gelişen yenilikçi teknolojiler sayesinde daha uzun mesafelerde daha hızlı kablosuz veri aktarımına olanak sağlıyor. Ayrıca sunulan yöntemin OGC'nin küresel zorlukları çözmek ve günlük ihtiyaçları karşılamak için insanları, toplulukları ve teknolojiyi birbirine bağlayan misyonuyla uyumlu olduğuna da inanıyoruz. Bu yöntemi uygulamak için bir araya getirilen bileşenler (X3D, MySQL, PHP, Gerçek zamanlı LiDAR verileri vb.) henüz literatürde mevcut değildir ve geliştirilmeye açıktır.

Doğal afetlerle yaşamayı öğrenmemiz gereken bir ülkede varlığımızı sürdürdüğümüzü büyük bir acıyla hatırlatan 2023-Kahramanmaraş depremlerinin ardından, afet durumlarında doğru ve hızlı karar verebilmemizi sağlayacak sistemlere ihtiyacımız olduğunun bilinciyle yazdığımız bu tez çalışmasının gelecek zamanlara katkı sağlayacağını umuyoruz.

## KAYNAKLAR

- Amani, M., Ghorbanian, A., Ahmadi, S. A., Kakooei, M., Moghimi, A., Mirmazloumi, S. M., Moghaddam, S. H. A., Mahdavi, S., Ghahremanloo, M., Parsian, S., Wu, Q., & Brisco, B. (2020). Google Earth Engine Cloud Computing Platform for Remote Sensing Big Data Applications: A Comprehensive Review. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 13, 5326-5350. DOI:10.1109/JSTARS.2020.3021052
- Awad, M. M. (2017). Toward Robust Segmentation Results Based on Fusion Methods for Very High Resolution Optical Image and LiDAR Data. *IEEE Journal of Selected Topics In Applied Earth Observations And Remote Sensing*, 10(5). DOI:10.1109/JSTARS.2017.2653061
- Awrangjeb, M. (2015). Effective generation and update of a building map database through automatic building change detection from LiDAR point cloud data. *Remote Sensing*, 7(10), 14119-14150. DOI:10.3390/RS71014119
- Behr, J., Eschler, P., Jung, Y., & Zöllner, M. (2009). X3DOM: a DOM-based HTML5/X3D integration model. *Proceedings of the 14th International Conference on 3D Web Technology*, 127-135. DOI:10.1145/1559764.1559784
- Besl, P. J., Jain, R. C., Besl, P. J., & Jain, R. C. (1985). Three-dimensional object recognition. *ACM Computing Surveys (CSUR)*, 17(1), 75-145. DOI:10.1145/4078.4081
- Bhattacharjee, S., Ghosh, S. K., & Chen, J. (2019). Spatial interpolation. *Studies in Computational Intelligence*, 839, 19-41. DOI:10.1007/978-981-13-8664-0\_2
- Brutzman, D., & Daly, L. (2007). X3D: Extensible 3D Graphics for Web Authors. İçinde *X3D: Extensible 3D Graphics for Web Authors*. Elsevier. DOI:10.1016/B978-0-12-088500-8.X5000-7
- Calera, A., Campos, I., Osann, A., D'Urso, G., & Menenti, M. (2017). Remote Sensing for Crop Water Management: From ET Modelling to Services for the End Users. *Sensors* 2017, 17(5), 1104. DOI:10.3390/S17051104
- Candan, L. (2008). *Karbon-Fiber Takviyeli Kompozitler ve Polikarbonat Malzemelerin Lazerle Delme Parametrelerinin Belirlenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 232756.
- Carter, J., Schmid, K., Waters, K., Betzhold, L., Hadley, B., Mataosky, R., & Halleran, J. (2012). Lidar 101 : An Introduction to Lidar Technology , Data , and Applications. *National Oceanic and Atmospheric Administration NOAA Coastal Services, November*, 76. DOI: 10.5194/isprsarchives-XL-7-W3-1257-2015
- Dong, P., & Chen, Q. (2017). *LiDAR Remote Sensing and Applications*. CRC Press. DOI: 10.4324/9781351233354

- Duran, C., & Üstündağ, Ö. (2008). Mekansal Analizlerde Hava LiDAR (Light Detection And Ranging) Verilerinden Yararlanma Olanakları. *e-Journal of New World Sciences Academy*, 3(3), 453-463.
- Dutton, J. A. (2015). *Topographic Mapping with LiDAR - GEOG 481*. e-Education Institute, The Pennsylvania State University, <https://www.e-education.psu.edu/lidar/> (Ziyaret tarihi: 17 Ocak 2015)
- Forrester, P. A., & Hulme, K. F. (1981). Laser rangefinders. *Optical and Quantum Electronics*, 13(4), 259-293. DOI: 10.1007/BF00619793/METRICS
- Fuad, N. A., Ismail, Z., Majid, Z., Darwin, N., Ariff, M. F. M., Idris, K. M., & Yusoff, A. R. (2018). Accuracy evaluation of digital terrain model based on different flying altitudes and conditional of terrain using UAV LiDAR technology. *9th IGRSM International Conference and Exhibition on Geospatial & Remote Sensing (IGRSM 2018)*, 169(1), 012100, Kuala Lumpur, Malaysia, 24–25 Nisan 2018. DOI: 10.1088/1755-1315/169/1/012100
- Gibson, P. J. (2000). *Introductory Remote Sensing: Principles and Concepts*. London and New York: Routledge.
- Guo, Q., Su, Y., & Hu, T. (2023). LiDAR Principles, Processing and Applications in Forest Ecology. İçinde *LiDAR Principles, Processing and Applications in Forest Ecology*. Academic Press. DOI: 10.1016/B978-0-12-823894-3.01001-X
- Han, S., Brutzman, D., Lee, J., Yoo, K.-H., SIGGRAPH, & Association for Computing Machinery. (t.y.). *Proceedings, Web3D 2020 : 25th International Conference on Web 3D Technology*. 9-13 Kasım 2020.
- He, M., Zhu, Q., Du, Z., Hu, H., Ding, Y., & Chen, M. (2016). A 3D shape descriptor based on contour clusters for damaged roof detection using airborne LiDAR point clouds. *Remote Sensing*, 8(3). DOI: 10.3390/rs8030189
- Hoffhine Wilson, E., Hurd, J. D., Civco, D. L., Prisloe, M. P., & Arnold, C. (2003). Development of a geospatial model to quantify, describe and map urban growth. *Remote Sensing of Environment*, 86(3), 275-285. DOI: DOI: 10.1016/S0034-4257(03)00074-9
- Jiang, D., & Wang, K. (2019). The Role of Satellite-Based Remote Sensing in Improving Simulated Streamflow: A Review. *Water 2019, Vol. 11, Page 1615, 11(8)*, 1615. DOI: 10.3390/W11081615
- Jiang, S., Jiang, C., & Jiang, W. (2020). Efficient structure from motion for large-scale UAV images: A review and a comparison of SfM tools. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 167(April), 230-251. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2020.04.016
- Jiang, S., Jiang, W., Huang, W., & Yang, L. (2017). UAV-based oblique photogrammetry for outdoor data acquisition and offsite visual inspection of transmission line. *Remote Sensing*, 9(3). DOI: 10.3390/rs9030278

- Kim, H. S., & Won Lee, M. (2020). 3D Object Recognition Using X3D and Deep Learning. *Web3D 2020: 25th ACM Conference on 3D Web Technology*, 1-8, Kore, 9-13 Kasım 2020. DOI: 10.1145/3424616.3424703
- Kim, J.-S., Polys, N., & Sforza, P. (2015). Preparing and evaluating geospatial data models using X3D encodings for web 3D geovisualization services. *Web3D '15: Proceedings of the 20th International Conference on 3D Web Technology*, 55-63, Girit, Yunanistan, 18-21 Haziran 2015. DOI: 10.1145/2775292.2775304
- Lechner, A. M., Foody, G. M., & Boyd, D. S. (2020). Applications in Remote Sensing to Forest Ecology and Management. *One Earth*, 2(5), 405-412. DOI: 10.1016/J.ONEEAR.2020.05.001
- Levin, N., Kyba, C. C. M., Zhang, Q., Sánchez de Miguel, A., Román, M. O., Li, X., Portnov, B. A., Molthan, A. L., Jechow, A., Miller, S. D., Wang, Z., Shrestha, R. M., & Elvidge, C. D. (2020). Remote Sensing of Night Lights: A Review and An Outlook for The Future. *Remote Sensing of Environment*, 237, 111443. DOI: 10.1016/J.RSE.2019.111443
- Li, J., Yang, B., Chen, C., & Habib, A. (2019). NRLI-UAV: Non-Rigid Registration Of Sequential Raw Laser Scans and Images for Low-Cost UAV Lidar Point Cloud Quality Improvement. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 158(October), 123-145. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2019.10.009
- Lillesand, T. M., Kiefer, R. W., & Chipman, J. W. (2015). *Remote Sensing and Image Interpretation* (7th). USA: John Wiley & Sons, Inc. DOI: 10.1017/CBO9781107415324.004
- Lim, K., Treitz, P., Wulder, M., St-Onge, B., & Flood, M. (2003). LiDAR Remote Sensing of Forest Structure. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 27(1), 88-106. DOI: 10.1191/0309133303pp360ra
- Mao, B., & Cao, J. (2019). HTML5 Based 3D Visualization of High Density LiDAR Data and Color Information for Agriculture Applications. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 169(August 2018), 123-145. DOI: 10.1088/1755-1315/169/1/012100
- Meng, X., Currit, N., & Zhao, K. (2010). Ground Filtering Algorithms For Airborne LiDAR Data: A Review of Critical Issues. *Remote Sensing*, 2(3), 833-860. DOI: 10.3390/rs2030833
- Ørka, H. O., Jutras-Perreault, M.-C., Næsset, E., & Gobakken, T. (2022). A Framework for A Forest Ecological Base Map – An Example from Norway. *Ecological Indicators*, 136, 108636. DOI: 10.1016/j.ecolind.2022.108636
- Plesch, A., & McCann, M. (2015). The X3D Geospatial Component: X3DOM Implementation of GeoOrigin, GeoLocation, Geoviewpoint, and GeoPositionInterpolator Nodes. *Proceedings - Web3D 2015: 20th International Conference on 3D Web Technology*, 31-37. DOI: 10.1145/2775292.2775315

- Polat, N., & Uysal, M. (2016). An Overview to Airborne LiDAR System, Application Fields and Popular Pointcloud Softwares. *Afyon Kocatepe University Journal of Sciences and Engineering*, 16(3), 679-692. DOI: 10.5578/fmbd.41390
- Raj, T., Hashim, F. H., Huddin, A. B., Ibrahim, M. F., & Hussain, A. (2020). A Survey on LiDAR Scanning Mechanisms. *Electronics 2020, Vol. 9, Page 741*, 9(5), 741. DOI: 10.3390/ELECTRONICS9050741
- Roering, J. J., Mackey, B. H., Marshall, J. A., Sweeney, K. E., Deligne, N. I., Booth, A. M., Handwerger, A. L., & Cerovski-Darriau, C. (2013). 'You are HERE': Connecting The Dots With Airborne Lidar For Geomorphic Fieldwork. *Geomorphology*, 200(1), 172-183. DOI: 10.1016/j.geomorph.2013.04.009
- Schowengerdt, R. A. (2012). Remote Sensing: Models and Methods for Image Processing. *İçinde Remote Sensing: Models and Methods for Image Processing: Second Edition (3rd bs)*. Academic Press. DOI: 10.1016/C2009-0-21902-7
- Shan, J., & Toth, C. K. (2012). Topographic Laser Ranging and Scanning Principles and Processing. J. Shan & C. K. Toth (Ed.), *Taylor and Francis Ltd.* (Second, C. 66). Taylor and Francis Ltd.
- Sishodia, R. P., Ray, R. L., & Singh, S. K. (2020). Applications of Remote Sensing in Precision Agriculture: A Review. *Remote Sensing 2020, Vol. 12, Page 3136*, 12(19), 3136. DOI: 10.3390/RS12193136
- Sofonia, J. J., Phinn, S., Roelfsema, C., Kendoul, F., & Rist, Y. (2019). Modelling The Effects of Fundamental UAV Flight Parameters on Lidar Point Clouds to Facilitate Objectives-Based Planning. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 149, 105-118. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2019.01.020
- Sun, Y., & Polys, N. (2020). The Scalability of X3D4 PointProperties: Benchmarks on WWW Performance. *Proceedings - Web3D 2020: 25th ACM Conference on 3D Web Technology*. DOI: 10.1145/3424616.3424707
- Tarekegn, T. H., Haile, A. T., Rientjes, T., Reggiani, P., & Alkema, D. (2010). Assessment Of An ASTER-Generated DEM for 2D Hydrodynamic Flood Modeling. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 12(6), 457-465. DOI: 10.1016/J.JAG.2010.05.007
- Telling, J., Lyda, A., Hartzell, P., & Glennie, C. (2017). Review of Earth Science Research Using Terrestrial Laser Scanning. *Earth-Science Reviews*, 169(November 2016), 35-68. DOI: 10.1016/j.earscirev.2017.04.007
- Thiel, C., & Schmullius, C. (2016). *International Journal Of Remote Sensing Comparison of UAV Photograph-Based and Airborne Lidar-Based Point Clouds Over Forest From A Forestry Application Perspective Comparison Of UAV Photograph-Based and Airborne LiDAR-Based Point Clouds Over Forest From A Forestry Application Perspective*. DOI: 10.1080/01431161.2016.1225181

- Toth, C., & Józków, G. (2016). Remote Sensing Platforms And Sensors: A Survey. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 115, 22-36. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2015.10.004
- Tulldahl, H. M., Bissmarck, F., Larsson, H., Grönwall, C., & Tolt, G. (2015). Accuracy Evaluation of 3D LiDAR Data From Small UAV. *Electro-Optical Remote Sensing, Photonic Technologies, and Applications IX*, 9649, 964903. DOI: 10.1117/12.2194508
- URL-1: <https://www.web3d.org>, (Ziyaret tarihi: 13 Ocak 2019).
- URL-2: <https://www.raspberrypi.com/products/raspberry-pi-4-model-b/specifications/>, (Ziyaret tarihi: 01 Kasım 2020).
- URL-3: <http://support.lightware.co.za/sf45b/#/introduction>, (Ziyaret tarihi: 01 Mayıs 2021).
- URL-4: <https://www.web3d.org/x3dv4-highlights>, (Ziyaret tarihi: 17 Temmuz 2020).
- URL-5: <https://www.python.org/>, (Ziyaret tarihi: 10 Mayıs 2023).
- URL-6: <https://www.php.net/>, (Ziyaret tarihi: 10 Ocak 2019).
- URL-7: <https://jquery.com/>, (Ziyaret tarihi: 10 Ocak 2019).
- URL-8: <https://navio2.hipi.io/>, (Ziyaret tarihi: 18 Şubat 2022).
- URL-9: <https://www.cubepilot.com/>, (Ziyaret tarihi: 18 Şubat 2022).
- Vosselman, G. (George), & Maas, H.-Gerd. (2010). *Airborne and Terrestrial Laser Scanning*. Whittles Publishing.
- Xiao, J., Shen, Y., Ge, J., Tateishi, R., Tang, C., Liang, Y., & Huang, Z. (2006). Evaluating Urban Expansion and Land Use Change in Shijiazhuang, China, by Using GIS and Remote Sensing. *Landscape and Urban Planning*, 75(1), 69-80. DOI: 10.1016/j.landurbplan.2004.12.005
- Yang, B., & Chen, C. (2015). Automatic Registration of UAV-Borne Sequent Images and LiDAR Data. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 101, 262-274. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2014.12.025
- Yao, H., Qin, R., & Chen, X. (2019). Unmanned Aerial Vehicle for Remote Sensing Applications - A review. *Remote Sensing*, 11(12), 1-22. DOI: 10.3390/rs11121443
- Yoo, B., & Brutzman, D. (2009). X3D Earth Terrain-Tile Production Chain for Georeferenced Simulation. *Proceedings of Web3D 2009: The 14th International Conference on Web3D Technology*, 159-166. DOI: 10.1145/1559764.1559791
- Yu, J. H., Ge, L., & Rizos, C. (2011). Digital Elevation Model Generation Using Multibaseline Advanced Land Observing Satellite/Phased Array Type L-Band Synthetic Aperture Radar Imagery. *Journal of Applied Remote Sensing*, 5(1), 53510.

Zhu, F., Gong, K., & Huo, Y. (2012). A Wide Dynamic Range Laser Rangefinder with cm-Level Resolution Based on AGC Amplifier Structure. *Infrared Physics & Technology*, 55(2-3), 210-215. DOI: 10.1016/J.INFRARED.2012.01.003



## KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER

- Alhajhamoud, M., **Candan, L.**, Ilgaz, M. A., Cinar, I., Ozbey, S., Čorović, S., Miljavec D., Kayahan E., (2022). Laser Welding of 316L Austenitic Stainless Steel in an Air and a Water Environment. *Materials*, 15(6), 1-16. DOI: 10.3390/ma15062248
- Alhajhamoud, M., Özbey, S., Ilgaz, M. A., **Candan, L.**, Çınar, İ., Vukotić M., Čorović S., Miljavec D., Kayahan E., (2022). Laser Welding of Ti6Al4V Titanium Alloy in Air and a Water Medium. *Materials*, 15(24), 1-16. DOI: 10.3390/ma15249088
- Candan, L.**, Aktan, B. F., & Kaçar, E., (2021). Real-Time 3D Point Cloud Mapping with UAV LiDAR. *International Symposium On Applied Geoinformatics* 1-3. Riga, Letonya, 2-3 Aralık 2021. DOI: 10.15659/isag2021.12528
- Candan, L.**, Arslan, E., & Kaçar, E., (2019). Usage of Air Balloon Based LiDAR in Spatial Analysis and Real Time Mapping. *VI. International Earthquake Symposium Kocaeli 2019*, 99, Kocaeli, Türkiye, 25-27 Eylül 2019.
- Candan, L.**, Demir, A., & Akman, E., (2007). Effect of pulsed Nd YAG laser powers on 304 stainless steel welding. *Frontiers Of Fundamental And Computational Physics*, 311-312.
- Candan, L.** & Kaçar, E. (2023). Methodology of Real-Time 3D Point Cloud Mapping With UAV LiDAR. *International Journal of Engineering and Geosciences*, 8(3), 301-309. DOI: 10.26833/ijeg.1178260
- Canel, T., Kayahan, E., **Candan, L.**, Fidan, S., & Sinmazçelik, T., (2019). Influence Of Laser Parameters in Surface Texturing of Polyphenylene Sulfide Composites. *Journal of Applied Polymer Science*, 136(38). DOI: 10.1002/app.47976
- Kaçar, E., Erdem, A., Sanlı, M. M., Kayan, A., **Candan, L.**, Yıldız, U., Demir, A. (2016). Functionalized Hybrid Coatings on ABS Surfaces by PLD and Dip Coatings. *Journal Of Inorganic And Organometallic Polymers and Materials*, 26, 895-906. DOI: 10.1007/s10904-016-0392-9
- Kaçar, E., Mutlu, M., Akman, E., Demir, A., **Candan, L.**, Canel, T., Gunay, V. (2009). Characterization of The Drilling Alumina Ceramic Using Nd:YAG Pulsed Laser. *Journal Of Materials Processing Technology*, 209(4), 2008-2014. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2008.04.049
- Kayahan, E., **Candan, L.**, Aras, M., Gündoğdu, Ö., (2018). Surface Cleaning of Metals Using Low Power Fiber Lasers. *Acta Physica Polonica A*, 134(1), 371-373. DOI: 10.12693/aphyspola.134.371

## ÖZGEÇMİŞ

Levent CANDAN, 1986 yılında Kars ilinin Sarıkamış ilçesi Karakurt Köyünde başladığı ilköğrenimini Karakurt İlkokulu ve Karakurt Ortaokulu'nda tamamladı. Lise eğitimini Sarıkamış Lisesi'nde tamamladı. 1999 yılında Kocaeli Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü'nden 2004 yılında Fizikçi olarak mezun oldu. Yüksek lisansını 2008 yılında Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalı'nda tamamladı. 2009 yılından beri Kocaeli Üniversitesi Lazer Araştırma ve Uygulama Merkezi'nde Öğretim Görevlisi olarak çalışmaya devam etmektedir.

