



T.C.
KONYA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**FARKLI YOĞUNLUKTA YERSEL LAZER
TARAYICI NOKTA BULUTUNDAN 2B
YANSIMA GÖRÜNTÜSÜ OLUŞTURMA VE
NOKTA BULUTLARININ BİRLEŞTİRİLMESİ**

Esmâ Nur ALTINÖZEN

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Harita Mühendisliği Anabilim Dalı

Mayıs-2023
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL VE ONAYI

Esma Nur ALTINÖZEN tarafından hazırlanan “Farklı Yoğunlukta Yersel Lazer Tarayıcı Nokta Bulutundan 2B Yansıma Görüntüsü Oluşturma ve Nokta Bulutlarının Birleştirilmesi” adlı tez çalışması 18/05/2023 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Harita Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Başkan

Prof. Dr. Cevat İNAL

.....

Danışman

Prof. Dr. Cihan ALTUNTAŞ

.....

Üye

Doç. Dr. Hüseyin Zahit SELVİ

.....

Yukarıdaki sonucu onaylıyorum.

Prof. Dr. Saadettin Erhan KESEN
Enstitü Müdürü

Bu tez çalışması Konya Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü tarafından 221005023 nolu proje ile desteklenmiştir.

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

Esma Nur ALTINÖZEN

Tarih:

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

FARKLI YOĞUNLUKTA YERSEL LAZER TARAYICI NOKTA BULUTUNDAN 2B YANSIMA GÖRÜNTÜSÜ OLUŞTURMA VE NOKTA BULUTLARININ BİRLEŞTİRİLMESİ

Esmâ Nur ALTINÖZEN

**Konya Teknik Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Harita Mühendisliği Anabilim Dalı**

Danışman: Prof. Dr. Cihan ALTUNTAŞ

2023, 119 Sayfa

Jüri

**Prof. Dr. Cihan ALTUNTAŞ
Prof. Dr. Cevat İNAL
Doç. Dr. Hüseyin Zahit SELVİ**

Yersel lazer taramanın, kültürel mirasın belgelenmesi, bitki örtüsü analizi, madencilik, mimari detayların ve bina cephelerinin üç boyutlu (3B) rekonstrüksiyonuna kadar değişen birçok uygulama alanı için kullanılabilirliği kanıtlanmıştır. Ancak bütün bu uygulamalarda tek bir tarama istasyonundan 3B model elde etmek mümkün değildir. Farklı tarama istasyonlarından yapılan ölçümleri tek bir referans sisteminde birleştirmek gerekir. Bu da araştırmacılar için hâlen bir sorun olup yeni algoritmalar geliştirerek çözüm üretilmek istenmektedir. Şu anda nokta bulutlarının birleştirilmesi için en çok tercih edilen yöntem iteratif en yakın nokta yöntemidir. Bu yöntemden farklı olarak otomatik özellik tespiti algoritmaları veya manuel nokta bulutu eşleme yöntemleri gibi birçok yöntem geliştirilmiştir. Bu yöntemlerden birisi de cisim yüzeyinden dönen ve tarayıcıda kaydedilen lazer ışının yansıma değerleri kullanılarak oluşturulan iki boyutlu (2B) yansıma görüntüleri kullanılarak nokta bulutlarının otomatik ya da manuel olarak birleştirilmesidir. Bu çalışmanın amacı geometrik özelliklerin yetersiz kaldığı durumlarda yansıma görüntüleri ile nokta bulutlarının birleştirilmesi ve farklı tarama yoğunluğunun bu birleştirme sonucuna etkilerinin araştırılmasıdır. Bunun için yersel lazer tarayıcı (YLT) ile 3B ölçme alanının farklı nokta sıklığına sahip taramalar yapılmıştır. Elde edilen nokta bulutlarından 2B yansıma görüntüleri oluşturularak, bu yansıma görüntüleriyle nokta bulutları birleştirilmiştir. Yansıma görüntülerinden yapılan ikili birleştirmeye elde edilen sonucunun doğruluğu uygulamada yaygın olarak kullanılan iteratif en yakın nokta yöntemiyle karşılaştırılmıştır. Bu tezde, ölçülen nesnenin detay düzeyine ve karmaşıklığına ve tarama nokta yoğunluğuna bağlı olarak nokta bulutlarının yansıma görüntülerinden ikili birleştirilmesi iteratif en yakın nokta yöntemine yakın bir doğrulukla gerçekleştirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Nokta bulutu, Nokta bulutu yoğunluğu, Nokta bulutu birleştirme, Yersel lazer tarama, Yansıma görüntüsü, 3B model

ABSTRACT

MS THESIS

GENERATING 2D REFLECTANCE IMAGE FROM TERRESTRIAL LASER SCANNER POINT CLOUD OF DIFFERENT DENSITY AND REGISTRATION OF POINT CLOUD

Esmâ Nur ALTINÖZEN

**Konya Technical University
Institute of Graduate Studies
Department of Geomatics Engineering**

Advisor: Prof. Dr. Cihan ALTUNTAŞ

2023, 119 Pages

Jury

Prof. Dr. Cihan ALTUNTAŞ

Prof. Dr. Cevat İNAL

Assoc. of Prof. Dr. Hüseyin Zahit SELVİ

Terrestrial laser scanning has proven usability for many applications ranging from documentation of cultural heritage, vegetation analysis, mining, to three-dimensional (3D) reconstruction of architectural details and building facades. However, in all these applications, it is not possible to obtain a 3D model from a single scanning station. It is necessary to combine measurements from different scanning stations in a single reference system. This is still a problem for researchers, and it is desired to find solutions by developing new algorithms. Currently, the most preferred method for joining point clouds is the iterative nearest point method. Different from this method, many methods such as automatic feature detection algorithms or manual point cloud matching methods have been developed. One of these methods is the automatic or manual merging of point clouds using two-dimensional (2D) reflection images created by using the reflection values of the laser beam returning from the object surface and recorded in the scanner. The aim of this study is to combine reflection images and point clouds in cases where the geometric properties are insufficient and to investigate the effects of different scanning densities on this combination result. For this, scans with different spot frequencies of the 3D measurement area were made with terrestrial laser scanner (TLS). 2D reflection images were created from the obtained point clouds and point clouds were combined with these reflection images. The accuracy of the result obtained by binary fusion made from the reflection images was compared with the iterative closest point method, which is widely used in practice. In this thesis, pairwise merging of point clouds from reflection images is performed with an accuracy close to the iterative nearest point method, depending on the level of detail and complexity of the measured object and the scan point density.

Keywords: Point cloud, Point cloud density, Point cloud registration, Terrestrial laser scanning, Reflection image, 3D model

ÖNSÖZ

Öncelikle böyle güncel bir konuda çalışmamı sağladığı için ve araştırmalarım ya da tezimin yazım süresince herhangi bir sorunla karşılaştığımda ofisinin kapısı sürekli açık olan, değerli bilgileriyle her zaman yol gösteren Sayın hocam Prof. Dr. Cihan ALTUNTAŞ'a çok teşekkür ederim.

Ayrıca bu tez çalışmasının yürütülmesinde maddi olarak destek sağlayan Konya Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü'ne teşekkür ederim.

Son olarak bu süreçte desteği ve yardımlarıyla sürekli yanımda olan ve beni her zaman cesaretlendiren canım ağabeyim Dr. Ekrem ALTINÖZEN'e, tüm sabrıyla hep yanımda olan ve beni maddi manevi destekleyen canım annem Seher ALTINÖZEN ve canım babam Orhan ALTINÖZEN'e teşekkür ederim.

Esmâ Nur ALTINÖZEN
KONYA-2023

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
ÖNSÖZ	vi
İÇİNDEKİLER	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR	ix
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	4
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	8
3.1. Lazer Işını	10
3.2. LiDAR Tarama Sistemleri	13
3.3. Yersel Lazer Tarama.....	14
3.3.1. Yersel Lazer Tarayıcı Ölçüm Verisi ve Ölçme Prensipleri	14
3.3.2. Yersel Lazer Tarayıcı Koordinat Sistemi.....	15
3.3.3. Yersel Lazer Tarayıcıların Temel Bileşenleri.....	16
3.3.3.1. Mesafe ölçüm birimi	16
3.3.3.2. Açık ölçme birimi	16
3.3.3.3. Işın yönlendirici birimi.....	17
3.3.3.4. Kamera	17
3.4. Yersel Lazer Tarayıcı Mesafe Ölçme Yöntemleri	18
3.4.1. Doğrudan Uçuş Zamanlı Ölçme Yöntemi (Puls Metodu)	19
3.4.2. Dolaylı Uçuş Zamanlı Ölçme Yöntemi (Faz Karşılaştırma Yöntemi)	20
3.5. Yersel Lazer Tarayıcı Ölçü Hataları	22
3.6. Yersel Lazer Tarayıcı Ölçü Planlaması	28
3.7. Yersel Lazer Tarama Uygulama Alanları	30
3.7.1. Bitki Örtüsü Analizinde Yersel Lazer Kullanımı	30
3.7.2. Jeomorfolojik Değişikliklerin Tespitinde Yersel Lazer Tarayıcı Kullanımı	31
3.7.3. Arkeolojik Alanların Modellenmesinde Yersel Lazer Tarayıcı Kullanımı	32
3.7.4. Kültürel Mirasın Belgelenmesinde Yersel Lazer Tarayıcı Kullanımı	33
3.7.5. Madencilik Faaliyetlerinde Yersel Lazer Tarayıcı Kullanımı	35
3.7.6. Endüstriyel Uygulamalarda Yersel Lazer Tarayıcının Kullanımı	36
3.7.7. Olay Yeri İnceleme Çalışmalarında Yersel Lazer Tarayıcı Kullanımı.....	38
3.7.8. Tıp Alanında Yersel Lazer Tarayıcıların Kullanılması	39
3.7.9. Kent Modelleme Çalışmalarında Yersel Lazer Tarayıcı Kullanımı	39
3.8. Nokta Bulutu Yoğunluğu.....	40
3.9. Nokta Bulutlarının Birleştirilmesi	41
3.9.1. İteratif En Yakın Nokta (İEYN) Yöntemi	44
3.9.2. Yansıma Görüntüsünden Seçilen Eşlenik Noktalarla Birleştirme	47
3.9.3. Nokta Bulutundan Seçilen Hedef İşaretle Kontrol Noktalarıyla Birleştirme	49
3.9.4. Nokta Bulutundan Seçilen Detay Noktalarıyla Birleştirme.....	52

3.10. 2B Yansıma Görüntülerinin Oluşturulması	52
3.11. 3B Model Doğruluğunun Araştırılması	54
3.12. Arazi Çalışması	55
3.12.1. Hoca Ahmet Fakih Camii Arazi çalışması	55
3.12.2. Selçuk Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Arazi Çalışması	60
3.12.3. Yol Şevi Arazi Çalışması.....	62
3.13. Stonex X300 Yersel Lazer Tarayıcı.....	65
4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI.....	67
4.1. Hoca Ahmet Fakih Camii Nokta Bulutlarının Birleştirilmesi	67
4.1.1. Yansıma Görüntülerinden Seçilen Eşlenik Noktalarla Nokta Bulutlarının Birleştirilmesi.....	67
4.1.2. İteratif En Yakın Nokta Yöntemiyle Nokta Bulutlarının Birleştirilmesi.....	75
4.1.3. Nokta Bulutundan Seçilen Hedef İşaretli Kontrol Noktaları ile Nokta Bulutlarının Birleştirilmesi	78
4.1.4. Nokta Bulutundan Seçilen Eşlenik Detay Noktaları ile Nokta Bulutlarının Birleştirilmesi.....	79
4.1.5. Model Doğruluğu Araştırması	80
4.2. Selçuk Üniversitesi Teknoloji Fakültesi	82
4.2.1. Yansıma Görüntülerinden Seçilen Eşlenik Noktalarla Nokta Bulutu Birleştirilmesi.....	82
4.2.2. İteratif En Yakın Nokta Yöntemiyle Nokta Bulutlarının Birleştirilmesi.....	85
4.4.3. Nokta Bulutundan Seçilen Hedef İşaretli Kontrol Noktaları ile Nokta Bulutlarının Birleştirilmesi	88
4.4.4. Nokta Bulutundan Seçilen Eşlenik Detay Noktaları ile Nokta Bulutlarının Birleştirilmesi.....	88
4.3. Yol Şevi	89
4.3.1. Yansıma Görüntülerinden Seçilen Eşlenik Noktalarla Nokta Bulutlarının Birleştirilmesi.....	89
4.3.2. İteratif En Yakın Nokta Yöntemiyle Nokta Bulutlarının Birleştirilmesi.....	91
4.3.3. Nokta Bulutundan Seçilen Hedef İşaretli Kontrol Noktaları ile Nokta Bulutlarının Birleştirilmesi	93
4.3.4. Nokta Bulutundan Seçilen Eşlenik Detay Noktaları ile Nokta Bulutlarının Birleştirilmesi.....	93
5. TARTIŞMA.....	95
5.1. Sonuçların Nokta Yoğunluğu Bakımından Değerlendirilmesi.....	95
5.2. Sonuçların Ölçme Yüzeyi Özellikleri Bakımından Değerlendirilmesi	97
5.3. Sonuçların Yöntemler Bakımından Değerlendirilmesi.....	98
5.4. Sonuçların Eşlenik Nokta Sayısı Bakımından Değerlendirilmesi	99
5.5. Sonuçların Model Doğruluğu Bakımından Değerlendirilmesi.....	100
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	101
KAYNAKLAR	103
EKLER	108

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

x, y, z : Yersel lazer tarayıcı alet merkezli kutupsal koordinatları

r : Yersel lazer tarayıcı aletinden ölçülen noktaya olan eğik mesafe

α : Ölçüm doğrultusunun x eksenine yatayda yaptığı açı

θ : Ölçüm doğrultusunun yatayla yaptığı eğik açı

O_1 : Yersel lazer tarayıcı aletinin yerel koordinat sisteminin merkezi

O_2 : Yer merkezli koordinat sistemi

I_i : Pikselin yansımaya değeri

I_{min} : Görüntü piksellerinin en küçük yansımaya değeri

I_{max} : Görüntü piksellerinin en büyük yansımaya değeri

$s_i = [X_i, Y_i, Z_i]^T$ Hedef noktanın koordinatları

$t = [X_0, Y_0, Z_0]^T$ Bilinmeyen ötelenme miktarı

λ = Bilinmeyen ölçek faktörü

$R(\alpha, \beta, \gamma)$ = Dönme matrisi

$p_i = [x_i, y_i, z_i]^T$ Referans noktanın koordinatları

N = Tam dalga boyları

λ = Dalga boyu

$\Delta\lambda$ = Artık dalga boyu

n = Kırılma indisi

v = Işığın ölçme ortamındaki hızı

c = Işığın boşluktaki hızı.

Δr : Işın açısının sebep olduğu mesafe hatası

γ : Işın ıraksama açısı (radyan)

β : Işının ölçme yüzeyi normaliyle yaptığı açı

$r_a(x_a, y_a, z_a)$ = Referans nokta bulutundaki noktalar

$r_h(x_h, y_h, z_h)$ = Hedef nokta bulutundaki noktalar

Kısaltmalar

3B: 3 Boyutlu

2B: 2 Boyutlu

RGB: Red, Green, Blue

YLT: Yersel Lazer Tarayıcı

ToF: Time of Fly

LIDAR: Light Detection and Ranging

RANSAC: Random Sample Consensus

İEYN: İteratif En Yakın Nokta (Iterative Closest Point)

SIFT: Scale Invariant Feature Transform

FAST: Features from Accelerated Segment Test

RADAR: RADio Detection And Ranging

cw: continuous wave

DEM: Digital Elevation Model

FMCW: Frequency Modulated Continuous Wave

AMCW: Amplitude-Modulated Continuous wave

1. GİRİŞ

3 boyutlu (3B) ölçme ve modelleme uygulamalarının popülerliği her geçen gün artmakta ve daha geniş kullanım alanlarında ihtiyaç duyulan uygulama haline gelmektedir. 3B modelleme çalışmaları, yakın resim fotogrametrisiyle (yersel fotogrametri), hava fotogrametrisiyle veya 3B uygulamalarda en çok tercih edilen ve en son teknik olan lazer tarama yöntemiyle yapılabilmektedir. Lazer tarama; havadan uçak, helikopter gibi araçlarla ya da yerden yersel tarama cihazları kullanılarak yapılabilmektedir (Altuntaş, 2011). Farklı çalışma alanları yapılacak işin amacına, taranan alanın büyüklüğüne, istenilen ölçüm doğruluğuna ve kullanılacak yardımcı ekipmanın maliyetine dayalı olarak değişen özellikleri olan tarayıcılar gerektirirler. Tüm bu tarama çalışmaları LiDAR (Light Detection and Ranging) olarak da adlandırılmaktadır (Abdel-Aziz ve ark., 2015; Altuntaş, 2011).

Üç boyutlu LiDAR sistemlerinde, ölçme (tarama) noktasının mesafesi ve dönen ışının şiddeti ölçülür. Ardışık tarama noktaları bir araya gelerek nokta bulutu görüntüsünü oluşturur. Bu çalışmada LiDAR sistemlerinden yersel lazer tarama (YLT) tekniği ve nokta bulutlarının birleştirilmesi açıklanmıştır.

Yersel lazer tarama, geleneksel ölçme yöntemleri ile karşılaştırıldığında 3B nokta koordinatlarını çok yüksek hızda toplayabilen bir ölçme yöntemidir. YLT ölçme alanını yatay veya düşey yönlerde yeterli sıklıkta tarar. Her ölçülen nokta için aletten taranan noktaya olan eğik mesafe (r) ve tarama doğrultusunun tarayıcı aletin yatay ve düşey referans düzlemleriyle yaptığı açılar (β, α) ölçülür. Buna ek olarak cisim yüzeyinden dönen ölçme ışınının yansıma şiddeti de kaydedilir. Ayrıca YLT'lerde bütünleşik kamera sayesinde ölçülen noktalara renk ataması da yapılır. Ölçülen tarama noktaları için kaydedilen kutupsal koordinatlardan faydalanılarak tarayıcı alet merkezli dik koordinatlar (x, y, z) hesaplanır (Altuntaş, 2017). Lazer tarama nokta bulutu milyonlarca noktanın oluşturduğu ölçme verisidir.

Nokta bulutu, veri işleme ve donanım teknolojisindeki gelişmelere paralel olarak birçok disiplinler arası çalışmanın temel verisi haline gelmiştir. Çeşitli yazılımlarda veri kaybı olmadan farklı formatların kullanılması ve nesnelerin gerçekçi bir şekilde tasvir edilmesi bu eğilimin nedenlerinden bazılarıdır.

Her nokta bulutu tarayıcı alet merkezli lokal koordinatlardan oluşur. Yersel lazer tarayıcı ile ölçme alanın geometrisini nokta bulutu olarak tamamen kaydetmek için genellikle birden fazla sayıda istasyondan taramalar yapmak gerekir. Farklı

istasyonlardan yapılan taramaları ortak bir referans sisteminde birleştirerek ölçülen cisim ya da yüzey 3B olarak tasvir edilir. Ortak koordinat sistemi olarak genellikle nokta bulutlarından birisinin koordinat sistemi seçilir. Diğer taramalar referans olarak seçilen bu nokta bulutunun koordinat sistemine göre 3B dönüşüm yapılır. 3B koordinat dönüşümünü gerçekleştirmek için standart yöntem ardışık taramaların bindirmeli olarak yapılmasıdır. Ya da ölçme alanına birden fazla özel işaretli hedefler yerleştirilmeli ve lazer tarayıcıyla bu hedefler ölçülmelidir. Hedef işaretlerinin koordinatları jeodezik yöntemlerle ölçülerek de nokta bulutları birleştirilebilir. Ancak bu yaklaşım, hedeflerin yerleştirilmesi ve ölçülmesi için ekstra çaba gerektirir. Ayrıca, belirli yapılar için hedeflerin yerleştirilmesi zordur. Bu nedenle genellikle bindirmeli tarama ve buna uygun birleştirme yöntemleri tercih edilir. Bu yöntemlerin başında iteratif en yakın nokta ve en küçük kareler 3B görüntü eşleme gelmektedir. Belirtilen yöntemler YLT nokta bulutundan oluşturulan yansıma ve mesafe görüntüsü üzerinden eşlenik nokta tespiti yapılarak nokta bulutları birleştirilebilmektedir. Yansıma görüntüsü, 3 boyutlu ölçme alanının ışınların yansıma değerleri ile oluşturulan 2 boyutlu görüntüsüdür. Işığın yansıma oranı farklı olan yüzeylerde ışınların yansıma şiddeti de farklı olacaktır. Bu özellikten yararlanılarak ölçü noktaları yansıma şiddetleri ile gri tonlu olarak renklendirilir ve detaylar ayırt edilebilir hale getirilir.

Bu tezin amacı YLT farklı nokta yoğunluğuna sahip nokta bulutlarından yansıma görüntüleri elde etmek ve bu yansıma görüntüleri ile nokta bulutları birleştirmektir. Çalışmamızda yansıma değerlerini nokta bulutuna kaydedebilme özelliğine sahip olması sebebiyle Stonex X300 yersel lazer tarayıcı tercih edilmiştir. Stonex X300 yersel lazer tarayıcı kullanılarak, üç farklı geometrik yüzeye sahip hedeflere 0,5 cm, 1 cm, 3 cm, 5 cm ve 10 cm yoğunluklarında taramalar gerçekleştirilmiştir. Bu geometrik yüzeyler Konya Hoca Ahmet Fakih Camii, Konya Selçuk Üniversitesi Teknoloji Fakültesi ve yol şevidir. Bu geometrik yüzeylerin seçilmesinde Hoca Ahmet Fakih Camii için kesme taş, betonarme, ahşap kapı, ahşap pencere gibi farklı yansıma özelliklerine sahip detaylar barındırması etkili olmuştur. Teknoloji fakültesi için birçok pencere ve cam detayları benzer yansıma özelliklerine sahip olması ve bu durum yansıma görüntüsü oluşturmayı etkilemesi, yol şevi için ise yüzeyinde bulunan taş, beton ve kuru bitki örtüsü birbirine çok yakın yansıma özelliklerine sahip olması etkili olmuştur. Seçilen bu üç farklı geometrik yüzeye yapılan taramalar sonucu oluşturulan farklı yoğunluktaki nokta bulutlarından MATLAB yazılımında oluşturulan kod kullanılarak yansıma görüntüleri oluşturulmuştur. Elde edilen bu yansıma görüntülerinin nokta bulutlarının birleştirilme

doğruluğuna etkisi, iteratif en yakın nokta (İEYN) yöntemi ile karşılaştırılmıştır. Ayrıca nokta bulutları, nokta bulutundan seçilen hedef işaretli kontrol noktalarıyla ve nokta bulutundan seçilen eşlenik detay noktalarıyla birleştirilmiştir. Elde edilen bulgular araştırma sonuçları ve tartışma bölümünde detaylandırılmıştır.



2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Yersel lazer tarama, kültürel miras binaları, heykeller vb. gibi nesnelerin yüzeylerinin üç boyutlu temsilini sağlar. Çoğu durumda, ölçme alanının tam kapsayan nokta bulutunu elde etmek için bir ya da daha fazla tarama istasyonundan alınan nokta bulutu verilerine ihtiyaç vardır. Farklı tarama istasyonlarından elde edilen nokta bulutları tek bir referans sistemine dönüştürülmelidir (Wang ve Brenner, 2008). Yersel lazer tarama nokta bulutlarının otomatik birleştirilmesi, düzensiz nokta dağılımı ve düşük dokulu yüzeylerde hala bir sorundur. Günümüzde taramalar arasındaki bağlantı noktalarının belirlenmesi, taramadan önce ölçme alanına yerleştirilen özel hedef işaretler kullanılarak çözülmektedir. Hedeflerin ölçme alanına yerleştirilmesi ve toplanması oldukça zaman alıcıdır ve genellikle tarama süresini beş katı kadar zaman harcanmaktadır (Brenner ve ark., 2008; Wang ve Brenner, 2008). Bu gibi sorunlara çözüm geliştirmek için araştırmacılar birçok etkileşimli ve otomatik yöntem tanıtmıştır. Nokta bulutları bindirmeli olarak oluşturulmuşsa iteratif en yakın nokta yöntemi (Besl ve McKay, 1992) veya en küçük karelerle 3B eşleme yöntemi gibi mevcut ikili birleştirme yöntemleri kullanılabilir (Böhm ve Becker, 2007). Ayrıca RGB (renk değerleri) kullanılarak da 3B nokta verileri otomatik olarak birleştirilebilir. Bunun dışında 3B nokta bulutu verilerinden 2B yansıma görüntüsü oluşturularak bu yansıma görüntüsü üzerinden otomatik özellik tespiti yapan algoritmalar kullanılarak da ikili otomatik birleştirmeler gerçekleştirilmiştir (Abmayr ve ark., 2008; Alba ve ark., 2011; Altuntas, 2014; Böhm ve Becker, 2007; Kang ve Lu, 2011; Makreshanski, 2010).

Literatür incelendiğinde dünyada 2B yansıma görüntüleri ile ilgili çalışmalar şu şekildedir. Altuntaş (2014) yaptığı çalışmada, Lazer tarama verilerinden yansıma görüntüleri oluşturmuş ve ardından bir ölçekten bağımsız özellik noktası tespiti (SIFT) ve Affin SIFT (ASIFT) ile yansıma görüntülerinden çıkarılan özellik noktaları ile ikili bir otomatik birleştirme yapmıştır. Sonuçları, yüksek doğruluğa sahip ve ikili birleştirme için yaygın olarak benimsenen yöntem olan iteratif en yakın nokta yöntemi ile karşılaştırmıştır. Sonuç olarak, yansıma görüntülerinden çıkarılan SIFT ve ASIFT yerel özellik noktaları, nokta bulutlarının ikili otomatik birleştirilmesi için kullanılabileceğini göstermiştir.

Ashraf ve ark. (2017) 3B LiDAR nokta bulutu verisinden 2B yansıma görüntüsü oluşturma yöntemleri olan çift doğrusal, doğal komşu, bi-kübik, Kriging, ters mesafe ağırlıklı ve en yakın komşu enterpolasyonu (en yakın eşlenik noktanın tahmin edilmesi)

dahil olmak üzere enterpolasyon tekniklerini kullanarak LiDAR verilerinden yoğunluk görüntüleri üretmeye odaklanmıştır. Ana amaçları 2B yansıma görüntüsü üretimi için enterpolasyon yöntemlerinin uygunluğunu test etmek ve oluşturulan 2 boyutlu görüntünün kalitesini analiz etmektir. Sonuçlar, ters mesafe ağırlıklı enterpolasyonun, 2 boyutlu yansıma görüntüsü kullanılması durumunda diğer yöntemlerden daha iyi performans göstermiştir.

Zhu ve ark. (2021) hava görüntüleri ve LiDAR verilerinin birleştirilmesinin geometrik ve radyometrik bozulmalardan dolayı zor olması sorununu çözmek için bir yöntem geliştirmişlerdir. Bu yöntem mekansal kısıtlamalar ve Gabor yapısal özellikleri kullanılarak önce yaklaşık daha sonra hassas olmak üzere iki aşamada gerçekleştirilen birleştirme yöntemidir. Yöntem şu şekilde işler. İlk aşamada, LiDAR nokta bulutu verileri, yoğunluk görüntüsüne dönüştürülüp referans görüntü olarak kullanılır. Daha sonra, hava görüntülerindeki düzgün dağılmış özellik noktalarını çıkarmak için FAST (Features from Accelerated Segment Test) operatöründen bölüm tabanlı özellikler tespit edilerek yaklaşık birleştirme tamamlanır ve ardından dış oryantasyon parametreleri kullanılarak doğrusallık denklemlerine dayalı yerel bir geometrik düzeltme yapılır. İkinci aşamada, görüntülerin çok ölçekli ve çok yönlü yapısal özelliklerini yakalamak için ilk olarak tek Gabor yöntemine çok ölçekli ve çok yönlü özellikleri adı verilen yeni bir özellik tanımlayıcısı oluşturulmuştur. Son olarak, elde edilen kontrol noktaları yalnızca geometrik düzeltmeleri iyileştirmek için kullanılmaz, aynı zamanda hava görüntülerinin ve LiDAR verilerinin hassas birleştirilmesini elde etmek için de kullanılır. Elde edilen sonuçlar, önerilen yöntemin geometrik bozulmalara karşı dirençli olduğunu ve radyometrik değişikliklerden etkilenmediğini göstermiştir.

Cheng ve ark. (2020) LiDAR nokta bulutundan oluşturulan 2B yansıma görüntülerini kullanan, otonom araçlar için yol çizgisi çıkarımı yaklaşımını önermiştir. Bu yaklaşımda 2B yansıma görüntüsünden yol çizgisi çıkarımı derin öğrenme yoluyla gerçekleştirilmiştir. Manuel ve derin öğrenme yoluyla çıkarılan şerit işaretleri karşılaştırılmış ve sonuçta derin öğrenme yöntemi manuele göre daha iyi performans gösterilmiştir.

Wietrzykowski ve Skrzypczynski (2021) 3B LiDAR SLAM (simultaneous localization and mapping) yöntemi için yansıma görüntülerini kullanan yeni bir yaklaşım geliştirmişlerdir. Son zamanlarda otonom araçların temel bileşenlerinden biri haline gelen 3B LiDAR SLAM yöntemlerinin çoğu iteratif en yakın nokta yöntemini kullanmaktadır. Ancak bu yöntemin benzer geometri özelliklerine sahip nesnelere güvenilirliği

tartışmalara neden olmuştur. Bu amaçla nesneden geri yansıyan ışının yoğunluğuna dayalı yöntemi önermişlerdir. Önerilen yöntemin sonuçları, elde edilen kaliteli yansıma görüntüleri sayesinde önemli ölçüde daha iyi sonuçlar elde edilmesini sağlamıştır.

Yan ve ark. (2021) LiDAR mesafe-yoğunluk görüntülerini kullanan yeni bir algoritma tanıtmışlardır. 3B LiDAR'ın geleneksel uygulamaları genellikle nokta bulutu verilerinde bulunan nesnelerin geometrik bilgilerine odaklanır ve bu da LiDAR verilerinin uygulamasını nispeten sınırlı hale getirir. Bununla birlikte, daha fazla bilgi (örneğin, nesnenin yoğunluk bilgisi), tespit edilen nesnelerin verimli bir şekilde sınıflandırılması ve özellik çıkarımı için faydalıdır. Önerdikleri algoritma tarafından ölçülen lazer yoğunluğunun gürültüye karşı dayanıklı olduğu ve LiDAR'ın iletim özelliklerine uygun olarak çalıştığı kanıtlanmıştır. Önerilen algoritma deneysel olarak test edilmiştir, elde edilen sonuçlara göre testlerde çeşitli gürültü koşulları altında 0,3 ns'den daha az bir hata elde etmiştir. Böylece DCFD algoritması, PK algoritması ve Gauss ile karşılaştırıldığında daha iyi hassasiyet gösterdiği görülmüştür.

Guo ve ark. (2019) LiDAR yansıma görüntülerini kullanan navigasyon sistemini sunmuştur. Geliştirilen navigasyon sistemi iyi bir performans göstermiştir.

Kang ve ark. (2009) panoramik yansıma görüntülerini kullanarak yersel lazer tarama (YLT) nokta bulutlarının otomatik birleştirilmesine yeni bir yaklaşım sunmuştur. Yaklaşımları hem ikili birleştirme hem de çoklu birleştirme içeren iki aşamalı bir prosedürü takip eder. İkili birleştirme, görüntü ile nokta bulutu (pikselden noktaya) dönüşümü yapmaktadır. Yansıma görüntülerinin yanlış eşleşmeleri, geometrik değişmezlik kontrolü ile kaldırılır. Sonuçlar, ikili ve global birleştirme doğruluklarının sırasıyla milimetre ve santimetre mertebesinde olduğunu ve sürecin tamamen otomatik olduğunu ve hızlı bir şekilde gerçekleştirildiğini göstermektedir.

Kang ve Zlatanova (2007) yansıma görüntülerini kullanarak YLT nokta bulutlarını otomatik olarak birleştirmek için bir algoritma geliştirmişlerdir. Algoritma, yansıma görüntülerine özgü olan pikselden noktaya geçişten yararlanır ve böylece optik görüntülerin kullanıldığı nokta bulutu birleştirme durumunda kamera kalibrasyonunu ve kameradan tarayıcıya birleştirmeye gerek kalmaz. Ancak bu algoritmaları panoramik birleştirmeye uygun değildir.

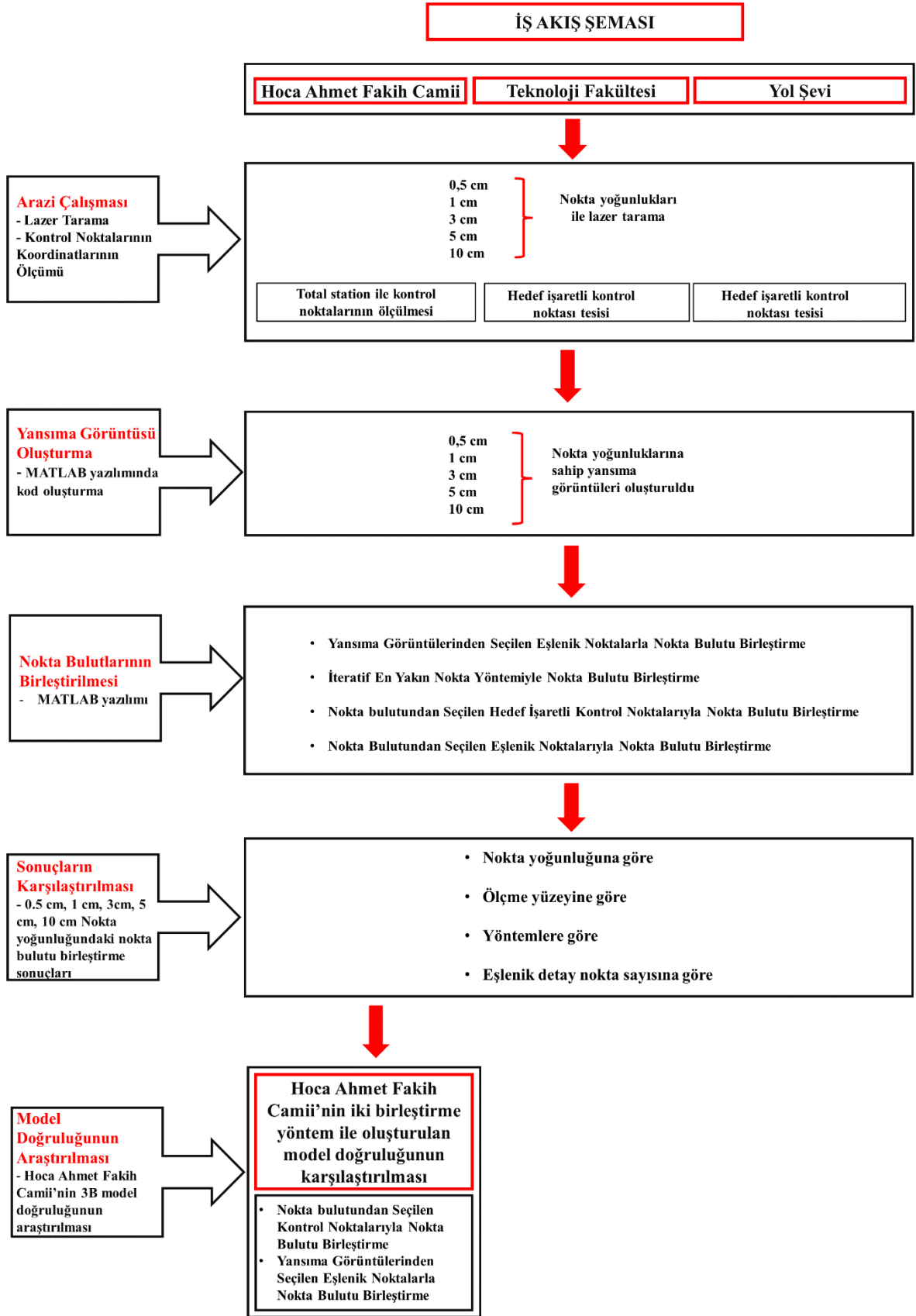
Barfoot ve ark. (2016) LiDAR'ın hem mesafe hem yansıma bilgilerini ölçme yeteneğinden yararlanan bir görsel navigasyon sistemini paylaşmıştır. Özellikle, tam ışıktan tam karanlık koşullara kadar, görsel odometri ve görsel öğretim ve tekrarlama gibi görevleri gerçek zamanlı olarak gerçekleştirmek için LiDAR yansıma görüntülerini

kullanmışlardır. Bu ışık değışmezliği, lazer tabanlı görüntüleyicilerin hareket ederken tarama özelliği nedeniyle, hareket bozulmasıyla başa çıkmasını sağlamıştır.



3. MATERYAL VE YÖNTEM

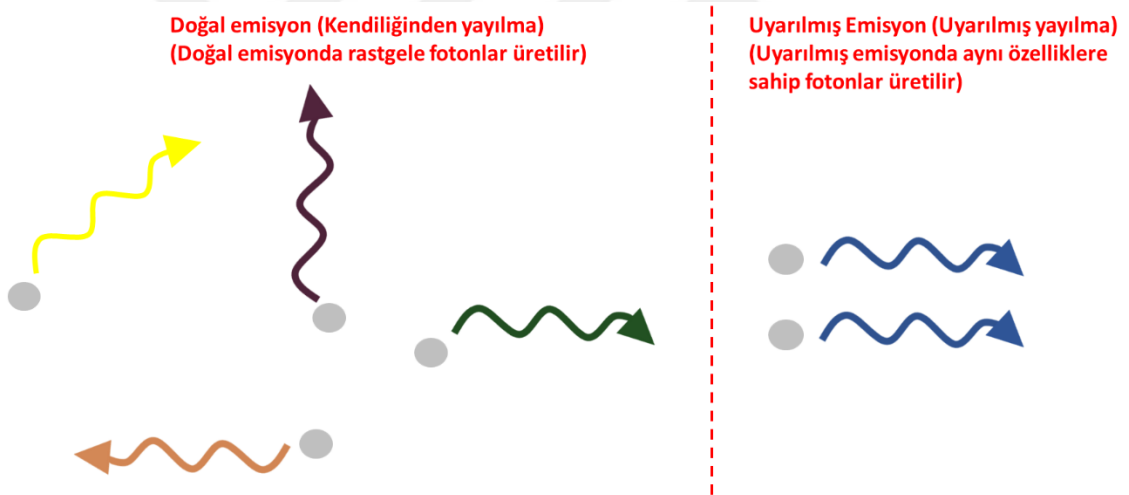
Tez çalışması kapsamında ilk aşama olarak arazi uygulaması gerçekleştirilmiştir. Arazi uygulamasında farklı geometrik yüzeylere sahip olan Hoca Ahmet Fakih Camii, teknoloji fakültesi ve yol şevine 0,5 cm, 1 cm, 3 cm, 5 cm ve 10 cm nokta yoğunluklarına sahip taramalar gerçekleştirilmiştir. Bu nokta yoğunluklarındaki XYZ koordinatları, geometrik yüzeylerin yansıma özellikleri ve renk (RGB) değerleri nokta bulutuna kaydedilmiştir. Ayrıca belirlenen geometrik yüzeylere yerleştirilen hedef işaretlerinin koordinatları total station ile ölçülerek kaydedilmiştir. İkinci aşamada MATLAB yazılımında oluşturulan kodla tüm nokta yoğunluklarındaki taramalara ait nokta bulutlarından yansıma görüntüleri oluşturulmuştur. Bir sonraki aşamada farklı tarama istasyonlarından elde edilen nokta bulutları birbirinden bağımsız dört yöntem kullanılarak birleştirilmiştir. Bu yöntemler sırasıyla yansıma görüntülerinden seçilen eşlenik detay noktalarıyla nokta bulutlarının birleştirilmesi, nokta bulutundan seçilen detay noktalarıyla nokta bulutlarının birleştirilmesi, nokta bulutundan seçilen hedef işaretli kontrol noktalarıyla nokta bulutlarının birleştirilmesi ve son olarak iteratif en yakın nokta yöntemiyle nokta bulutlarının birleştirilmesidir. Son aşama olarak nokta bulutlarının birleştirme sonuçları belirlenen kriterlere (nokta yoğunluğuna, kullanılan yöntem ve seçilen eşlenik detay noktası sayısına) göre değerlendirilerek sonuçlar paylaşılmıştır. Tez çalışması kapsamında takip edilen yöntem ve yöntemlerin uygulama sırasını gösteren iş akış şeması Şekil 3.1’de verilmiştir.



Şekil 3.1. Tez çalışması iş akış şeması

3.1. Lazer Işını

1960 yılında T.H.Maiman lazer ışını tanımını kullanmasıyla lazer ile ilgili araştırmalar derinleşmiştir. Lazer ışının fizikteki önemini kavramak için, başka hiçbir insan yapımı kaynağın lazer darbeleri kadar kısa (şu anda 10^{-16} sn'in altında) darbeler (herhangi bir türden) üretemeyeceğini veya mutlak frekansları ölçmek için araçlar üretemeyeceğini belirtmek yeterli olacaktır. Normal ışık, ampul, LED veya yıldız gibi geleneksel (farklı fazlarda) bir ışık kaynağında, kaynaktan çıkış enerjisiyle uyarılan her atom, belirli bir istatistiksel olasılığa göre rastgele tek bir foton yayar. Bu, dalga boylarının yayılmasıyla ve tek tek fotonlar arasında hiçbir ilişki olmadan her yönde radyasyon üretir. Buna kendiliğinden yayılma denir. Lazer ışını ise uyarılmış yayılmaya sahiptir ve bu tür ışınlar aynı özelliklere sahip fotonlar üretebilir (Şekil 3.2). Kendiliğinden yayılma rastgele bir süreçtir yani rastgele fotonlar üretir. Uyarılmış yayılma ise aynı özelliklere sahip fotonlar üretir.



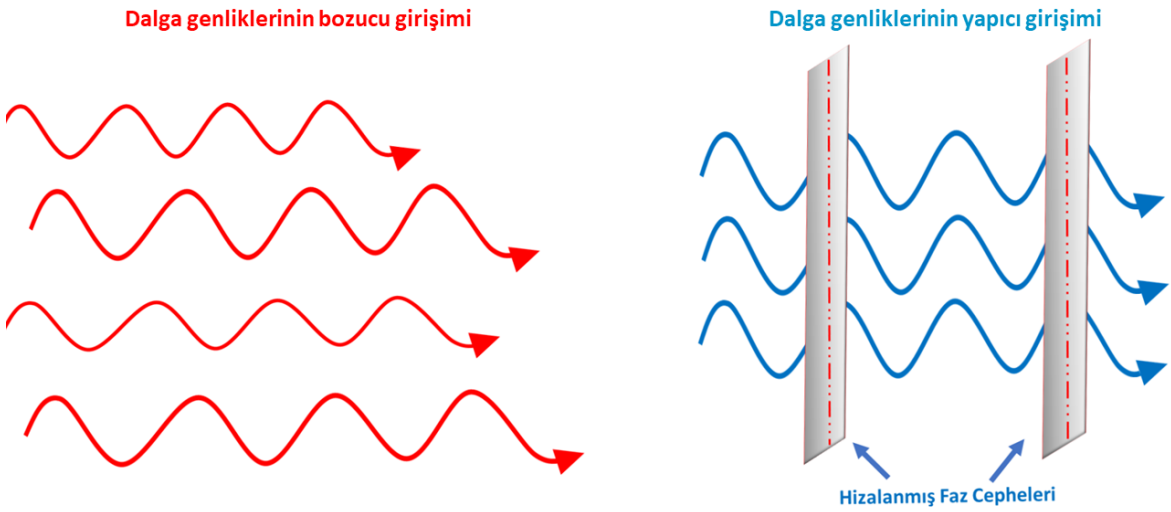
Şekil 3.2. Kendiliğinden (doğal) yayılma ve uyarılmış yayılma foton üretimi

Einstein, uyarılmış atomların, uyarılmış yayılma adı verilen bir işlemle depolanan enerjiyi ışığa dönüştürebileceğini tahmin etmiştir. Bu süreç uyarılmış bir atomun rastgele yayılmayla bir foton üretmesiyle başlamaktadır. Bu foton başka bir uyarılmış atoma ulaştığında, etkileşim o atomu ikinci bir foton yayması için uyarır (Şekil 3.2). Bu sürecin iki önemli özelliği vardır. İlk olarak, çarpımsaldır. Yani bir foton diğer bir uyarılmış atomla etkileşime girdiğinde iki foton oluşur. Bu iki foton diğer iki uyarılmış atomla etkileşime girerse, bu toplam dört foton verir ve bu böyle devam eder. İkincisi ve en önemli özelliği ise bu iki fotonun dalga boyu, yönü, faz ve polarizasyon özelliklerinin

aynı olmasıdır. Yeterli sayıda uyarılmış atom varlığında ışığı "yükseltme" yeteneği, lazer işleminin temeli olan "optik kazanca" yol açar ve uyarılmış ışımaya yoluyla ışık yükseltimi yani lazer (**L**ight **A**mplification by **S**timulated **E**mission of **R**adiation) oluşur.

Lazer ışınının normal ışıktan ayıran bazı özellikler mevcuttur. Bu özellikleri şu şekilde sıralayabiliriz;

- **Tek renklilik:** Bir fotonun enerjisi dalga boyunu $E = h.c/\lambda$ ilişkisi aracılığıyla belirler; burada h Planck sabitidir, c ışık hızıdır ve λ dalga boyudur. İdeal bir lazer, tüm fotonları tam olarak aynı enerjiye ve dolayısıyla aynı dalga boyuna sahip yayar ve tamamen tek renkli olur.
- **Tutarlılık:** Lazer ışınının aynı dalga boyunu sahip olmalarının yanı sıra, bir lazer ışınının oluşturan fotonların tümü aynı fazdadır (Şekil 3.3). Işığın ideal davranışı olarak tanımlanan durum, belirli bir yön boyunca düz bir dalga şeklinde yayılan ve bu yöne dik olan her bir düzlemin belirli bir zamanda aynı elektrik ve manyetik alan genliğine ve fazına sahip olmasıdır. Gerçek lazer ışınları bu ideal davranıştan biraz sapar, ancak yine de ideal tutarlı bir düzlem dalgaya en iyi yaklaşan kaynaklar lazer ışınlarıdır.



Şekil 3.3. Lazer ışığı, tüm ışık dalgalarının birbiriyle aynı fazda olması bakımından geleneksel ışıktan farklıdır.

- **Yönlendirilebilme:** Lazer ışını geleneksel ışıktan farklı olarak yönlendirilebilir. Bu özellik sayesinde lazer ışını belirlenen doğrultularda yönlendirilebilir.
- **Parlaklık:** Güneş, bir birim yüzey alanından büyük miktarda radyasyon yayar, ancak bu birçok farklı yönde yayılır. Aksine, bir lazer ışını tek bir yönde

yönlendirilebilir ve bunun sonucunda parlaklığı, güneşinkinden çok daha yoğundur. Bu nedenle, bir lazer tarayıcıdan gelen sadece 5 mW'lık güç, göz için doğrudan güneş ışığından daha fazla "körleştirici" ve tehlikelidir.

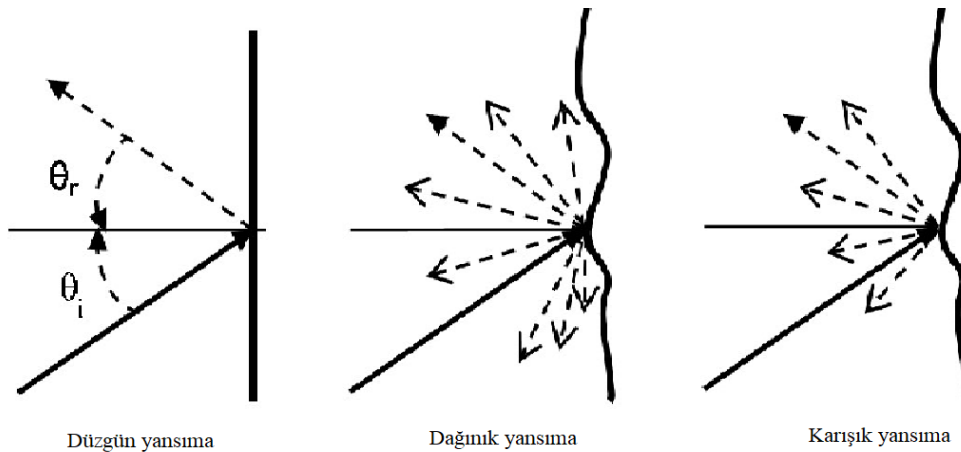
Lazer ışınlarını göze etkilerine göre dört farklı sınıfa ayırabiliriz bunlar;

- 1. Sınıf lazer ışını: Göze zararlı etkisi yoktur
- 2. Sınıf lazer ışını: Işına kısa süreli (20sn den az) maruz kalınması durumunda göze zararı yoktur.
- 3. ve 4. sınıf lazer ışınları: Göze zararlı etkileri olan ışınlardır.

Yüksek enerjisi sayesinde, bir lazer ışını çok uzak mesafelere yansıtılabilir veya çok küçük bir noktaya odaklanabilir. Herhangi bir nesneden yansıyan ışının yansıma şiddetini etkileyen birçok unsur vardır. Bunları kısaca şu şekilde sıralayabiliriz (Ingensand, 2006; Lichti ve Harvey, 2002; Reshetyuk, 2006).

- Nesnenin rengi
- Nesnenin dokusu (pürüzlülüğü)
- Nesnenin ısısı ve nemi
- Lazer ışınının nesneden geri yansıma açısı.
- Yüzeylerin manyetizma, elektrik iletkenliği vb. özellikleri

Şekil 3.4'te yüzeylerin yüzey pürüzlülüğüne göre yansıma türleri verilmiştir. Burada yüzey pürüzlülüğü dalga boyundan küçükse düzgün yansıma, yüzey pürüzlülüğü dalga boyuna eşitse dağınık yansıma, yüzey pürüzlülüğü dalga boyundan büyükse karışık yansıma gerçekleşir.



Şekil 3.4. Yüzey malzemesi özelliğine bağlı oluşan yansıma türleri (Altuntas, 2020).

3.2. LiDAR Tarama Sistemleri

LiDAR tarama sistemleri, son yıllarda olağanüstü gelişmelere konu olmuştur. 90'lı yıllardan beri kullanımı giderek artmış ve en önemli konumsal veri toplama teknolojisi haline gelmiştir. Hem havadaki hem de karadaki platformlara kurulan bu sistemler, büyük hacimlerde 3B verileri yüksek bir doğrulukla toplayabilir. Lazer verilerinin işlenmesi fotogrametrik yöntemlere göre nispeten daha az karmaşıktır. Bu durum lazer teknolojinin farklı alanlarda kullanımını daha da hızlandırmıştır. Lazerin icadı 1960'ların başına kadar gitse de çeşitli destekleyici teknolojilerin eksikliği, bu cihazın haritalama alanında 20-30 yıl boyunca kullanılmasını engellemiştir. 1990'ların ortalarında doğrudan coğrafi konumlandırma teknolojisinin tanıtılması ve bilgisayar teknolojisindeki genel gelişmeler, ticari olarak uygulanabilir olan topografik haritalama sistemlerinin geliştirilmesini sağlayan önemli teknolojiler olmuştur. Bu teknolojilerden sonra çeşitli tiplerde lazer tabanlı ölçme araçları tasarlanmış ve kısa süre sonra saha araştırma çalışmalarında kullanılmaya başlanmıştır.

LiDAR tarama sistemleri kullanılan platformun türüne göre yersel LiDAR, hava LiDAR ve mobil LiDAR tarama olarak üçe ayrılabilirler. Yersel LiDAR tarayıcılar sabit sistemlerdir ve karmaşık detaylar yüksek çözünürlükle taraya bilmektedirler (Olsen ve ark., 2010). Hava LiDAR tarayıcıları uçağa monte edilir ve uçağın hareketine entegre olarak yüksek yoğunlukta nokta bulutu elde edebilir. LiDAR sistemi, radar göre daha küçük bir bölüme odaklanabildiği için geometrik çözünürlüğü (nokta bulutu yoğunluğu) ve doğruluğu daha yüksektir (Kobler ve ark., 2007). Mobil tarama sistemleri gerçekleştirilecek uygulamanın ihtiyaçlarına göre farklı şekillerde kullanılabilir. Yersel ve hava LiDAR için kullanılan veri işleme yöntemleri, nokta yoğunluğu ve noktaların taranma biçimi sebebiyle farklılık gösterebilir (Jaakkola ve ark., 2008; Lim ve ark., 2003; Pu ve ark., 2011). Mobil LiDAR bir objeyi pek çok farklı açıdan görüntüleyebilir ve tek bir nokta bulutu oluşturduğundan bazı uygulamalarda önemli avantajlar sağlar (Pu ve ark., 2011). Gerçekleştirilecek uygulamanın türüne göre belirli bir LiDAR türü seçilebilir, ya da ihtiyaçlar doğrultusunda bu üç LiDAR tarama tekniği birlikte kullanılabilir. Günümüzdeki en büyük zorluk bu üç tarama sisteminin ürettiği yüksek yoğunlukta ölçme verisini verimli bir şekilde işleyecek veri işleme yazılımlarının geliştirilmesidir.

3.3. Yersel Lazer Tarama

Kültür varlıkları insanlığın ortak mirası olarak gelecek nesillere aktarılacak son derece önemli yapılardır. Bu nedenle, belgelenmesi bu sürecin önemli bir yönüdür. Özellikle şekillerini, boyutlarını, renklerini kaydetmek, mimarların orijinal formlarını restore etmelerine ve yok olduklarında onları yeniden inşa etmelerine olanak sağlayabilir (Altuntas ve ark., 2016). Yersel lazer tarayıcılar sağladıkları kolaylıklar sayesinde tarihi eserlerin 3 boyutlu modellenmesi ve kültürel mirasın belgelenmesi çalışmalarında sık sık başvurulan güvenilir bir yöntemdir (Wang ve Li, 2020). YLT ile kısa sürede çok yoğun nokta bulutu verileri ölçülebilir. Elde edilen yüksek yoğunluklu nokta bulutları ise görüntü işleme teknikleriyle yüksek doğrulukta kolaylıkla birleştirilebilir. Sağladığı bu kolaylık ve yüksek doğruluk sayesinde fotogrametrik yöntemlerden avantajlıdır (Altuntas, 2015).

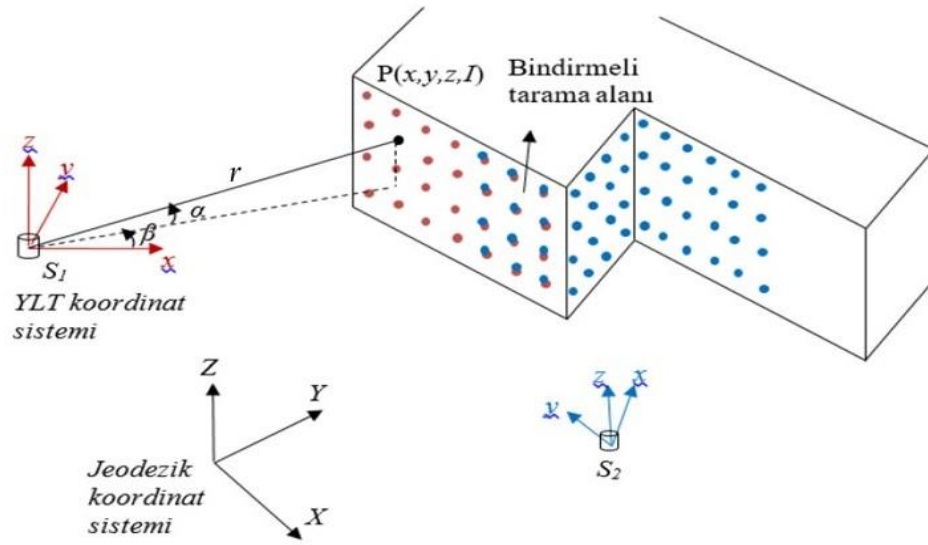
3.3.1. Yersel Lazer Tarayıcı Ölçüm Verisi ve Ölçme Prensipleri

Yersel lazer tarayıcılar ölçümü yapılacak nesnelere kısa nokta sıklıklarıyla tarar. Tarama sonucu elde edilen ölçüm verisi nokta bulutu olarak adlandırılır. YLT ölçme mesafesi ölçmede kullanılacak ölçme yöntemine göre değişir. Puls yöntemi kullanan tarayıcılar için maksimum ölçme mesafesi 6-8 km, faz farkı ölçme yöntemini kullanan tarayıcılar için ise yaklaşık 700 – 800 m civarındadır.

YLT' lerde ölçüm sonucu elde edilen nokta bulutu verisi şunları içermektedir;

- Yersel lazer tarayıcının ölçümü yapılacak obje üzerindeki noktaya olan mesafesi (r)
- Ölçümün yapıldığı doğrultunun düşey ve yatayla yaptığı açılar (θ, α)
- Ölçülen objeden geri yansıyan ışının yansıma şiddeti değeri (I)
- Renk değerleri (RGB)

Bütün tarama noktaları için bu veriler ölçülür ve 3 boyutlu (X, Y, Z) koordinatları hesaplanır (Altuntas, 2020). Şekil 3.5'te iki farklı istasyondan yapılan bindirmeli tarama görüntüleri görülmektedir.



Şekil 3.5. YLT ile ölçülen büyüklükler ve koordinat sistemleri (S_1 ve S_2 farklı ölçme noktalarından yapılan bindirmeli taramaları ifade etmektedir (Altuntaş, 2017).

3.3.2. Yersel Lazer Tarayıcı Koordinat Sistemi

YLT koordinat sistemi başlangıcı aletin faz merkezi olan bir dik koordinat sistemidir. Bu dik koordinat sisteminin x,y eksenleri yatay bir düzlem tanımlar z eksenini düşey doğrultuya yönlendirilmiştir. Tarama ışınının yatay açısı (α) x,y düzleminde x ekseninden itibaren saat ibresinin tersi yönünde oluşan açıdır. Tarama ışınının düşey açısı (θ) ise yatay düzlemden itibaren olan eğim açısıdır (Şekil 3.6). Ölçülen kutupsal koordinatlardan tarayıcı alet merkezli 3B (x,y,z) dik koordinatlara geçiş Denklem 3.1 ile ifade edilir (Altuntaş ve Yıldız, 2008; Elkhachy ve Niemeier, 2006; Lichti ve Gordon, 2004).

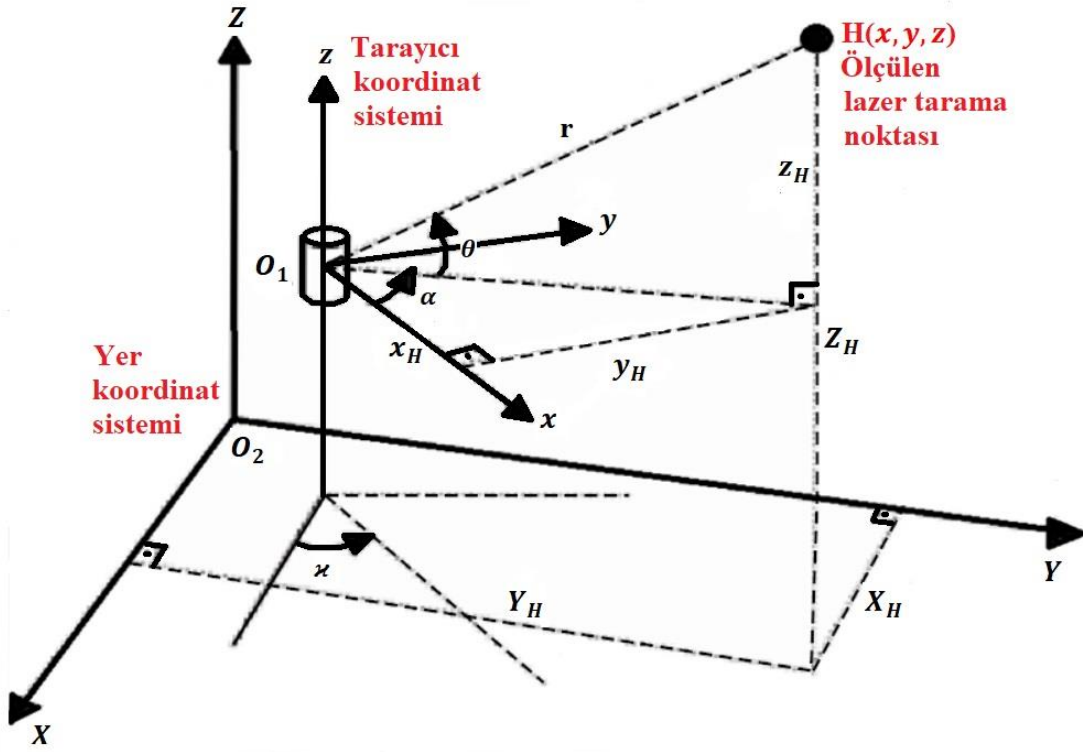
$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = r \begin{bmatrix} \cos\theta\cos\alpha \\ \cos\theta\sin\alpha \\ \sin\theta \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

3.1 Eşitliğinde;

- x, y, z : Yersel lazer tarayıcı alet merkezli kutupsal koordinatları,
- r : Yersel lazer tarayıcı aletinden ölçülen nesneye olan eğik mesafe,
- α : Ölçüm doğrultusunun x eksenine yatayda yaptığı açı,

- θ : Ölçüm doğrultusunun yatayla yaptığı düşey açıyı ifade eder.

Lazer tarayıcı ölçüleri ölçülen objeyi gerçek boyutları ile temsil eder. Yani nokta bulutu verileri 1:1 ölçeklidir.



Şekil 3.6. Yersel lazer tarayıcı koordinat sistemi ve yer merkezli koordinat merkezi (Altuntaş ve Yıldız, 2008).

3.3.3. Yersel Lazer Tarayıcıların Temel Bileşenleri

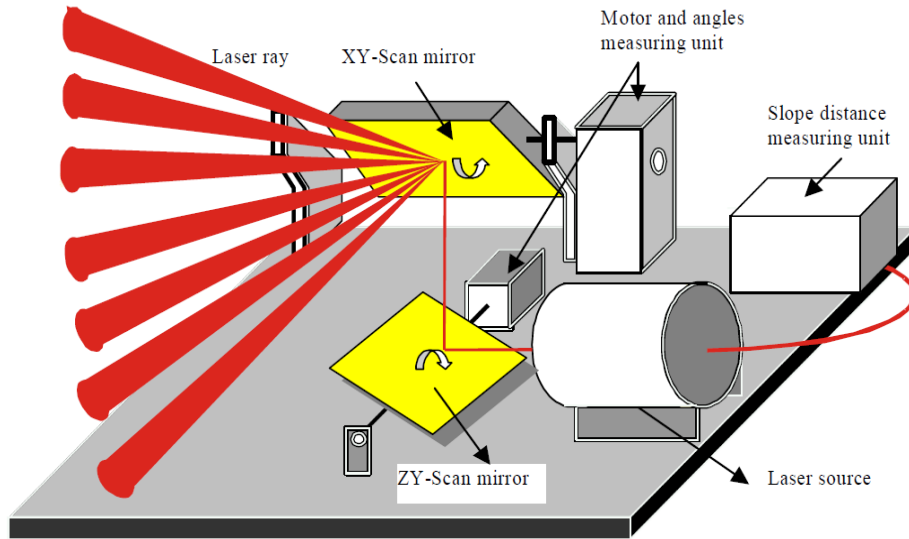
Yersel lazer tarayıcılarda mesafe ölçümü, YLT bileşenleri yardımıyla gerçekleştirilir. Bu bileşenleri şu şekilde sıralayabiliriz;

3.3.3.1. Mesafe ölçüm birimi: YLT'lerde mesafe ölçüm birimi tarayıcı aletin kullanacağı ölçme yöntemine göre tasarlanır. (Uçuş zamanlı ölçme yöntemi, faz karşılaştırma yöntemi vb.) Mesafe ölçme birimi ışın gönderici kaydedici ve faz ölçerden oluşur.

3.3.3.2. Açı ölçme birimi: Yatay ve düşey açıların ölçülmesi ışın sapırma birimiyle gerçekleştirilir. Kamera benzeri tarayıcılarda, yatay ve düşey açıları, açısal konum sensörleri tarafından kaydedilen aynaların açısal sapmalarından elde edilir. Işının yatay veya düşey yönlere sapmasını sağlayan aynalardır. Lazer tarayıcılar iki tip açı ölçüm birimine sahip olabilirler. Bunlar ya iki adet galvonometrik (dönen, çokgen ayna) ayna

ya da bir tanesi dönen çokgen diğeri galvonometrik aynadır. Her iki sistemde yüksek çözünürlüğe sahip açı ölçme sensörü kullanılır.

3.3.3.3. Işın yönlendirici birimi: YLT'lerde ışın yönlendirici olarak üç tip ayna kullanılır. Bunlar; dönen çokgen aynalar (galvonometrik), dönen düz aynalar ve salınan aynalardır. Literatürde dönen düz aynalarla ilgili detaylı bilgi bulunmamaktadır. Dönen çokgen aynaların üç ya da daha fazla sayıda yansıtıcı yüzeyi vardır bu aynalar maliyet açısından en uygun olanlarıdır. Diğer bir avantajı geniş tarama açısı ve hızıdır. Galvonometrik aynalar dönen çokgen aynalar olup sabit frekanslarda salınım yaparlar. Şekil 3.7'de üst üste uzanan iki düzlem aynaya dayalı bir algılama sistemi gösterilmektedir. Birinci ayna, y eksenine göre lazer ışığını dik olarak yansıtabilir. Yansıyan ışık saçılmaz ve bir doğru boyunca hareket eder, bu nedenle ışının, x-z eksenini boyunca yön değiştirmesini ikinci ayna sağlar. Lazer ışının yüzeye temas etme açısına bağlı olarak ikinci ayna üzerinde x eksenini boyunca hareket eder. İkinci ayna ışının geliş açısı ile x eksenini etrafında döner. Böylece ışını yönlendirmiş olur. Işının yüzeye temas noktası ile birinci aynadan yansıyan ışık her zaman ikinci aynadaki dönüş eksenine dik olarak kırılmaz. Lazer ışını x-z eksenini boyunca bu şekilde yönlendirilir (Khrachy ve ark., 2008).

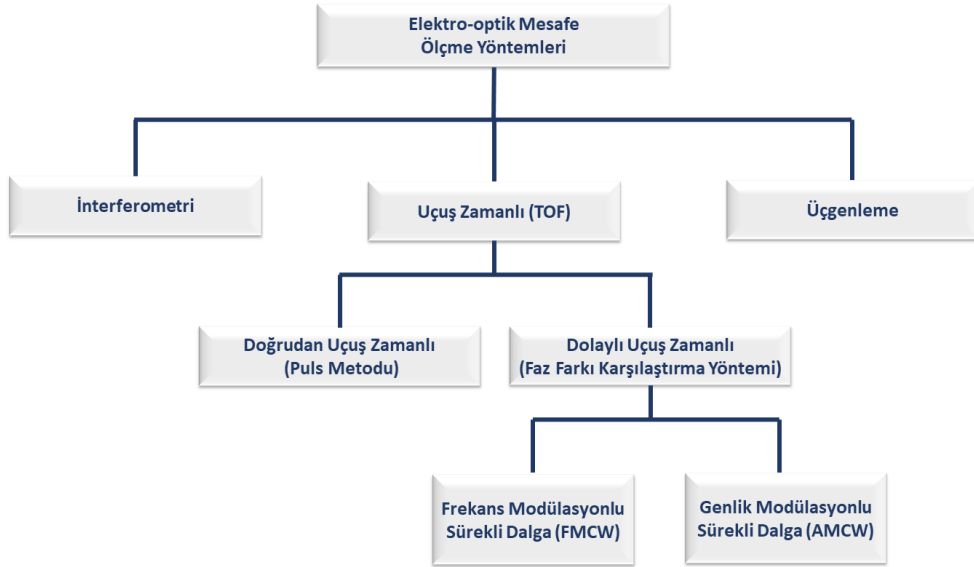


Şekil 3.7. Lazer tarayıcı ışın yönlendirici birimi (Schlemmer, 1996).

3.3.3.4. Kamera: Yersel lazer tarayıcılarda kameralar tarayıcı alete entegre olup ölçmenin fotoğraflanması ve tarama noktalarına renk değeri atanmasında kullanılır.

3.4. Yersel Lazer Tarayıcı Mesafe Ölçme Yöntemleri

Elektro-optik mesafe ölçme yöntemleri interferometri, time of fly (ToF) (ışın uçuş zamanlı) ve üçgenleme olmak üzere üç grupta toplanır. Uçuş zamanlı mesafe ölçme yönteminde gönderilen ve geri alınan sinyalin seyahat süresi ve ışık hızı yardımıyla mesafe ölçülmektedir (Şekil 3.8).



Şekil 3.8. Elektro-optik Mesafe Ölçme Yöntemleri (Zogg, 2008).

İnterferometri yöntemleri yersel lazer tarayıcılarda kullanılmayıp genellikle endüstriyel amaçlı ölçme aletlerinde kullanılmaktadır. Üçgenleme yönteminde kamera ve lazer ışık kaynağının oluşturduğu üçgen yardımı ile mesafe ölçülür. Bu yöntemde lazer ışını mesafe ölçmek için değil ölçülecek cisim noktaları için üçgen oluşturmada kullanılır. Yersel lazer tarayıcı ölçme aletleri uçuş zamanlı ölçme tekniklerini kullanmaktadır.

Yersel lazer tarama (YLT) tekniklerinde en çok başvurulan elektro-optik mesafe ölçme yöntemi uçuş zamanlı (ToF) mesafe ölçme yöntemidir. Uçuş zamanlı ölçme yöntemini doğrudan uçuş zamanlı (puls metodu) ve dolaylı uçuş zamanlı (faz farkı yöntemi) yöntem olmak üzere iki başlık altında incelenmektedir. Frekans modülasyonlu sürekli dalga yöntemi YLT'lerde nadir kullanılmakla beraber genelde Ladar teknolojisi olarak bilinmektedir.

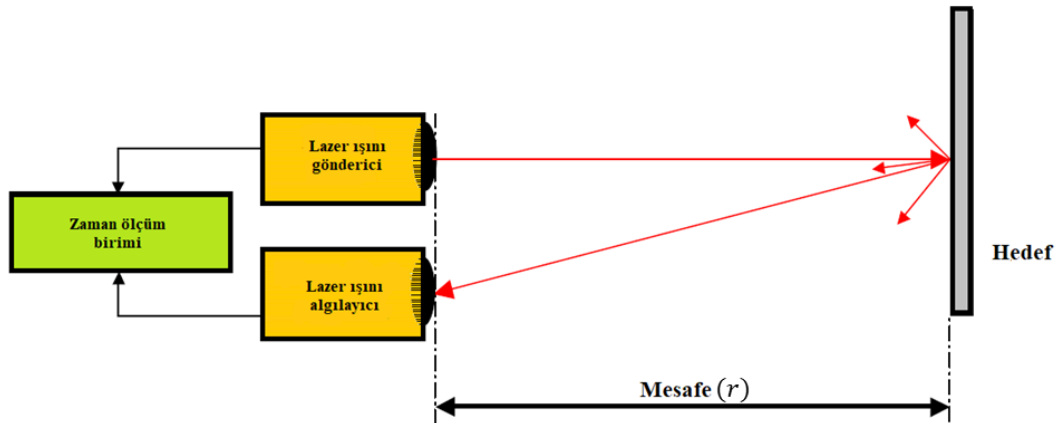
3.4.1. Doğrudan Uçuş Zamanlı Ölçme Yöntemi (Puls Metodu)

Uçuş zamanlı ölçme yönteminde lazer ışınının nesneye gidiş ve geliş süresi ile mesafe ölçülür. Bu yöntem uydu, hava ve yersel platformların üzerine monte edilen sensörlerle birkaç metreden yüzlerce kilometreye kadar olan uzaklıkları ölçmek için kullanılır.

Tüm uçuş zamanı (ToF) uygulamalarının arkasındaki ilke, nesneye gidip geri dönmek için bir ışık darbesinin aldığı zamanı (t), ölçmektir. Işığın hızı c bilindiği için kat edilen mesafeyi belirlemek mümkündür. Bu durumda ölçülen cisim noktasının lazer ışık kaynağına olan mesafesi kat edilen mesafenin yarısına eşit olacaktır (Denklem 3.2).

$$r = c \frac{t}{2} \quad (3.2)$$

Tipik bir doğrudan uçuş zamanlı ölçme yöntemi kullanan lazer tarayıcı sistemi Şekil 3.9'da gösterilmektedir. Lazer ışını gönderici birimi hedef objeye bir ışık darbesi gönderir ve zaman ölçüm birimi yüksek doğrulukta bir nanosaniye kronometreyi başlatır. Işık darbesi hedefe çarpar ve geri yansır. Işık darbesinin lazer ışını algılayıcı dedektör mekanizması tarafından alınması kronometreyi durdurur. Zaman ölçüm birimi, lazer ışınının başlangıcı ile geri dönüşü arasında geçen süreyi (t) ölçer.



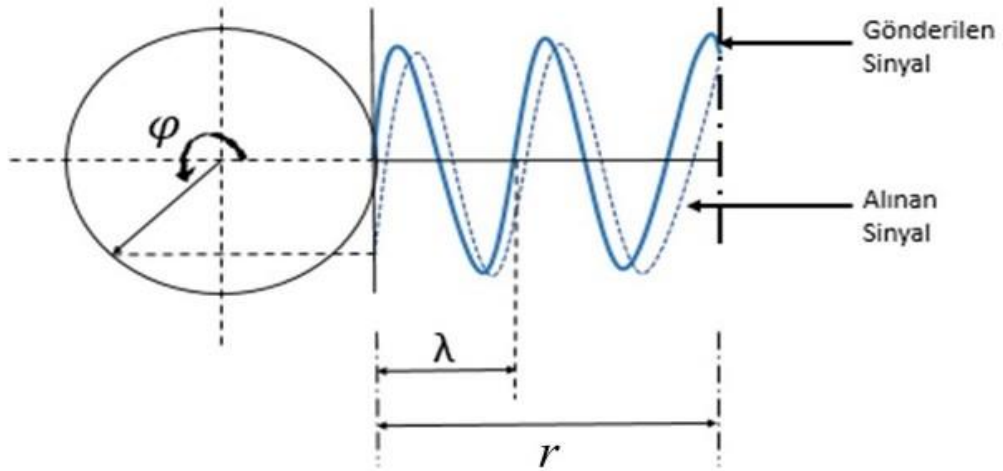
Şekil 3.9. Doğrudan uçuş zamanlı ölçme yöntemi kullanan lazer tarayıcı sistemi.

Bu ölçme yönteminde lazer ışını toz, duman vb. etkilerin bulunduğu ölçme ortamında hareket eder. Dolayısıyla ışının hızı boşluktaki ışık hızından farklı olur ve bu da ölçü doğruluğunu olumsuz etkiler.

3.4.2. Dolaylı Uçuş Zamanlı Ölçme Yöntemi (Faz Karşılaştırma Yöntemi)

Faz karşılaştırma yöntemi genellikle cw (continuous wave) lazer olarak bilinen lazer aletleriyle kullanılır. Pratikte doğrudan uçuş zamanlı yöntemi kullanan mesafe ölçme cihazlarıyla karşılaştırıldığında faz farkı yöntemini kullanan lazerlerin kuvvetinin az olması sebebiyle uzay ya da uçak platformlarında kullanımı sınırlıdır (Pfeifer ve Briese, 2007). Faz farkı karşılaştırma yöntemini kullanan yersel lazer tarayıcılar maksimum ölçme mesafesi 1 km civarındadır.

Dolaylı uçuş zamanlı mesafe ölçme yöntemi olan AMCW (Amplitude – Modulated Continuous Wave) yöntemde ise lazer ölçme aleti sinyal yerine sürekli genlik modülasyonlu bir dalga yayar. Yani AMCW faz farkı yöntemini kullanan yersel lazer tarayıcı aleti bir sonraki sinyalin dönüş sinyali alete ulaşmadan yeni sinyal gönderir (Boehler ve Marbs, 2002). Bu durumda, mesafe değeri, yayılan bu ışının sinüzoidal dalga modelinin gönderilen ve alınan sinyalleri arasındaki faz farkının karşılaştırılmasıyla elde edilir (Petrie ve Toth, 2017). Sürekli genlik modülasyonu mm seviyesinde doğruluğa ulaşmamıza imkân verir. Şekil 3.10’da faz karşılaştırma yönteminin çalışma prensibi gösterilmiştir.



Şekil 3.10. Faz karşılaştırma ölçme yöntemi çalışma prensibi (Altuntas, 2020).

Ölçülen mesafe tam dalga boyu uzunlukları toplamına faz açısına karşılık gelen artık kısım eklenerek bulunur (Denklem 3.3) (Altuntas, 2020; Altuntaş, 2021).

$$2r = N \cdot \lambda + \Delta\lambda \quad (3.3)$$

Denklem 3.3'te ;

r : Ölçülen mesafe

N : Tam dalga boyu sayısı

λ : Dalga boyu

$\Delta\lambda$: Artık dalga boyu

$\Delta\lambda$ artık dalga boyu miktarı $\Delta\varphi$ faz açısına bağlı olarak formülize edilir;

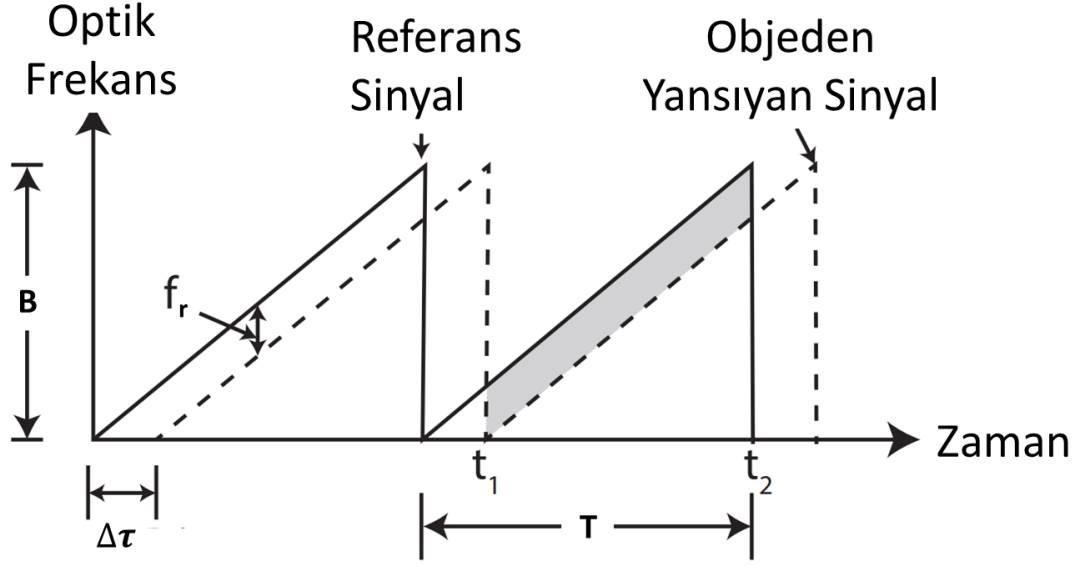
$$\Delta\lambda = \frac{\Delta\varphi \cdot \lambda}{2\pi}$$

Burada ölçülen mesafe ise şu şekilde formülize edilir;

$$r = \frac{N \cdot \lambda}{2} + \frac{\Delta\varphi \cdot \lambda}{4\pi}$$

Faz karşılaştırma (FMCW) yönteminde taşıyıcı dalganın frekansını yersel lazer tarayıcıdan gönderilen ölçme ışınının dalga hareketine uyması için periyodik şekilde azaltarak veya arttırarak değiştirir. Nesnenin yüzeyine temas ettikten sonra geri yansıyan sinyalle karşılaştırılarak aralarındaki faz farkı belirlenir (Şekil 3.11). Yersel lazer tarayıcı aletinin ve ölçülen noktanın sabit olması durumunda gönderilen ışının gidiş geliş (seyahat) süresine karşılık gelen sabit frekans değeri bulunabilir (Denklem 3.4). Ya da bunun yerine frekans değeri için artık dalga boyu hesaplanabilir. Bu durumda ise dalga boyuna karşılık gelen anlık frekans değişimi ise artık kısımdaki frekans değeri ToF zamanı ($\Delta\tau$) ile orantılı olacaktır (Altuntaş, 2021).

$$f_r = slope\Delta\tau = \frac{B}{T} t_{of} = \frac{B}{T} \frac{2R}{c} \rightarrow R = f_r \frac{cT}{2B} \quad (3.4)$$



Şekil 3.11. Nesne hedefi ve referans arasındaki farkları gösteren zamana karşı anlık optik frekansların şeması (Amann ve ark., 2001).

3.5. Yersel Lazer Tarayıcı Ölçü Hataları

Yersel lazer tarayıcılarda ölçü doğruluğunu etkileyen pek çok hata kaynağı vardır. Bu hataların bir kısmı sistematik bir kısmı ise rastgele oluşur. Sistematik hatalar aletten kaynaklı hatalardır. Sistematik olmayan hatalar ölçme ortamı cisim yüzeyi ve ölçü düzenine bağlı olarak oluşan hatalardır. Yersel lazer tarayıcı ölçülerini etkileyen hataları şu şekilde gruplandırmak mümkündür:

Cisim yüzeyinden kaynaklanan hatalar: Taranan nesnesinin özelliklerinden (örn. renk, yüzey madde yapısı ve parlaklığı) kaynaklanan hatalar.

Ölçme ortamından kaynaklanan hatalar: Ölçüm yapılan ortam koşullarından kaynaklanır. (Atmosferik etki, sarsıntı, rüzgâr, radyasyon vb.)

Lazer tarayıcı aletinden kaynaklanan hatalar: Lazer tarayıcı ölçme sisteminin yapısı ve bileşenlerinin mekanik olarak bir araya getirilmesinden kaynaklanan hatalar. (Saat hatası, ıraksama açısı, açısal çözünürlük, ışın yönlendirme vb.)

Ölçme düzenine bağlı hata: Ölçme düzeninin yanlış olmasına bağlı oluşan hatalardır. (Tarama ışının geliş açısı hatasına bağlı hata)

Bu hatalar aşağıda detaylı olarak açıklanmıştır.

1. Cisim Yüzeyinden Kaynaklanan Hatalar

Lazer tarayıcı, prizmalar veya reflektörler olmadan nesnelere üzerindeki noktaları ölçtüğünden, mesafe doğruluğu birkaç parametreden etkilenir (Lichti ve ark., 2000; Schulz, 2008). Ana parametrelerden birisi de taranan yüzeyin özellikleridir (örneğin

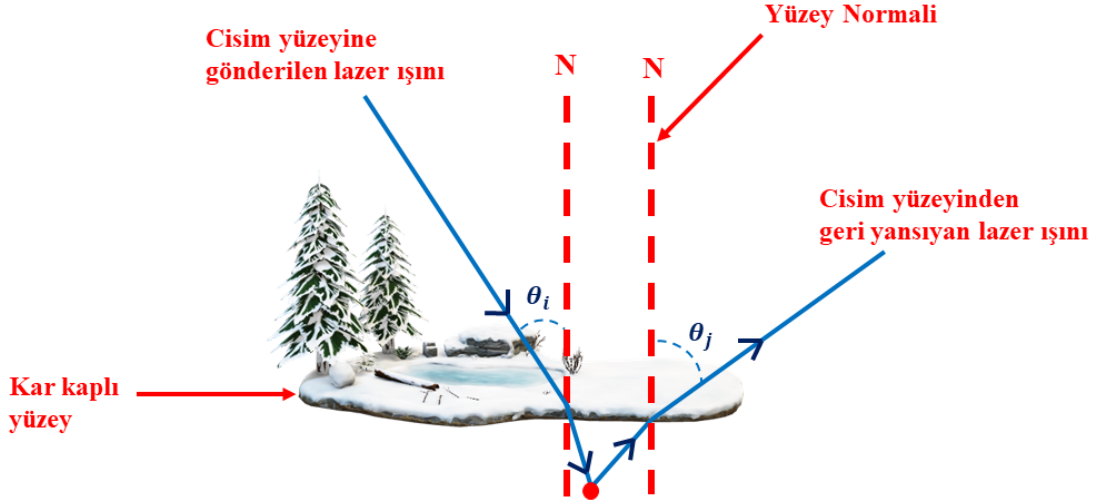
malzeme, pürüzlülük, renk). Cisim yüzeyinden kaynaklı hatalar yersel lazer tarayıcı sistemi için sistematik olmayan hatalar altında sınıflandırılmıştır.

Cisim yüzeyinden geri yansıyan lazer ışının gücü ölçü doğruluğunu etkiler. Işının gücü yüksek olursa ölçü doğruluğu da yüksek olacaktır. Cisim yüzeyinden geri yansıyan lazer ışının gücü yüzey malzemesinin özelliklerine ve lazer ışının dalga boyuna bağlıdır. Saydam, parlak ve açık renkli yüzeyler ışığı daha iyi yansıtır (Khrachy ve ark., 2008). Bazı yüzeylerin ışığı yansıtma oranları Çizelge 3.1’de verilmiştir.

Çizelge 3.1. Bazı yüzey materyallerinin ışığı yansıtma oranları (Khrachy ve ark., 2008)

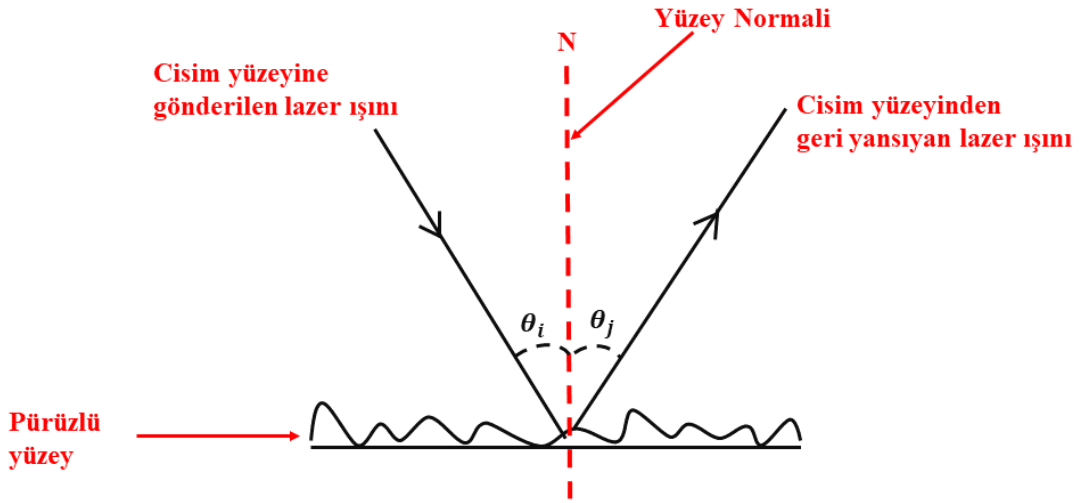
Cisim	Yansıma oranı
Beyaz kâğıt	% 100
Tahta, kereste materyal	% 94
Kar	% 80-90
Taş ve kaya yüzeyi	% 85
Kireçtaşı	% 75
Gazete kâğıdı (yazılı)	% 69
Yaprak döken ağaçlar	% 60
Kozalaklı iğne yapraklı ağaçlar	% 30
Karbonatlı kum (kuru)	% 57
Karbonatlı kum (ıslak)	% 41
Plaj kumu	% 50
Beton (düz yüzeyli)	% 24
Asfalt	% 17
Lav-yanardağ	% 8
Siyah yapay kauçuk	% 5
Araba lastiği (kauçuk yapı)	% 2

Cisim yüzeyleri yapıldıkları malzemedan veya dokusundan kaynaklı olarak lazer ışının bir kısmı yüzeyin içine nüfus eder. Yüzeyin içine giren ışın enerjisinin büyük bölümünü kaybeder ve uçuş süresinde artar. Ayrıca ışın yüzeyden ayrılırken farklı bir yansıma açısıyla geri döner. Bütün bunlar ölçü doğruluğunu olumsuz etkiler. Örneğin kar kaplı bir yüzeye lazerli ölçme aletiyle ölçüm yapıldığında lazer ışını kar taneciklerinin içine nüfus edip geri yansır (Altuntas, 2020) (Şekil 3.12).



Şekil 3.12. Kar kaplı yüzeyden lazer ışının yüzeyin içine nüfus etmesi ve sapmaya uğrayarak geri yansması.

Ölçülen yüzeyin pürüzlü olması da ölçüm doğruluğunu etkiler. Pürüzlü yüzeylerde lazer ışını yüzey normalinden bir miktar sapmaya uğrayarak geri yansır (Şekil 3.13).



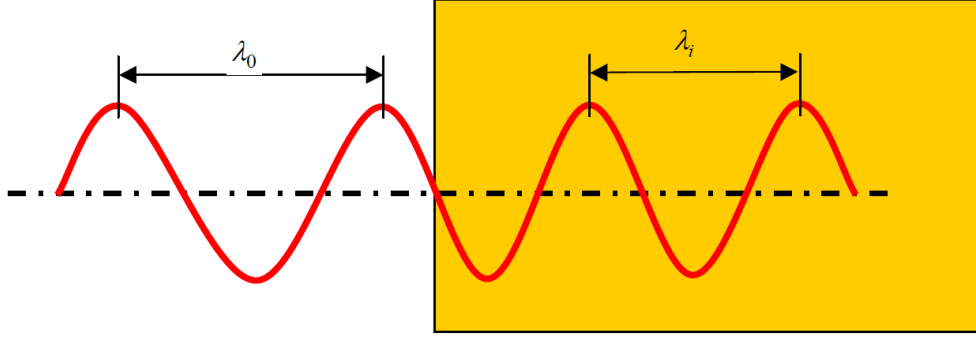
Şekil 3.13. Pürüzlü yüzeylerde lazer ışını bir miktar sapmaya uğrayarak yansıtılır.

2. Ölçme ortamından kaynaklanan hatalar

- Atmosferik etkilerden oluşan hatalar

Tüm elektromanyetik dalgalar boşlukta sabit hızda hareket eder. Ancak bu dalgalar bir iletici materyalden geçtiğinde hızları azalır. Işık boşlukta daha hızlı hareket eder. Farklı atmosferik ortamlardan geçen ışığın enerjisi ve doğrultusu değişir (Şekil

3.14). Işık herhangi bir maddeden, örneğin havadan geçtiğinde, atmosfer basıncında yavaşlar. Ortam şartları ışığın hızını ve doğrultusunu etkiler (Altuntas, 2020; Khrachy ve ark., 2008).



Şekil 3.14. Farklı hava ortamlarından geçerken ışığın dalga boyunun değişmesi (Khrachy ve ark., 2008).

Atmosferik şartlara göre ışığın hızının değişmesi kırılma indisi ile ifade edilir. Ölçme ortamının kırılma indisi, ışığın boşluktaki hızının o ortamdaki hızına oranıdır (Denklem 3.5).

$$n = \frac{c}{v} \quad (3.5)$$

Burada:

n = Kırılma indisi

v = Işığın ölçme ortamındaki hızı

c = Işığın boşluktaki hızı

dır.

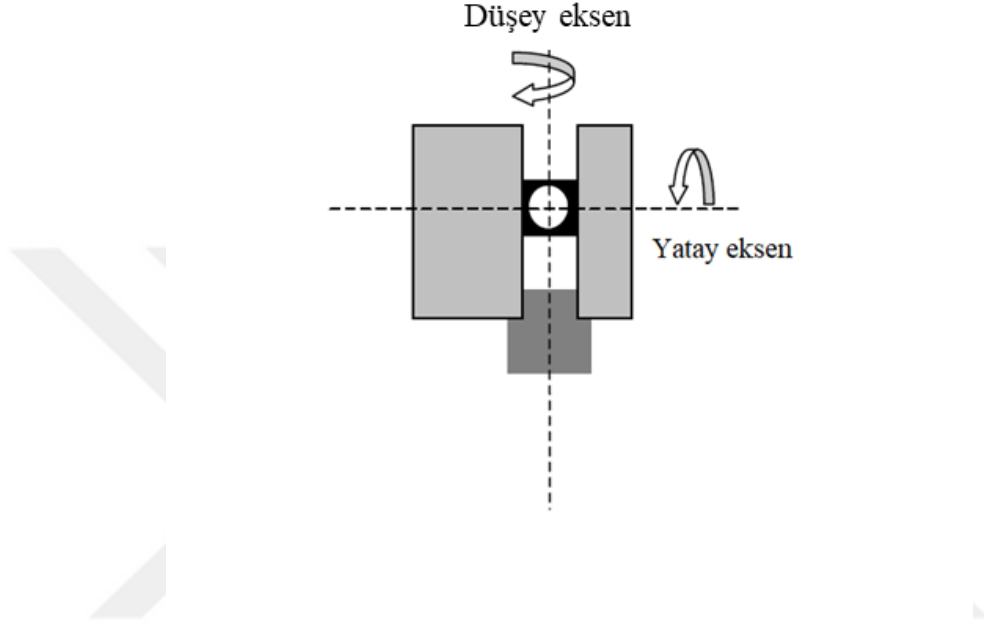
3. Yersel Lazer Tarayıcı Aletinden Kaynaklanan Hatalar

Yersel lazer tarayıcı aletinin yapısından kaynaklanan hatalara bağlıdır. Bir lazer tarayıcının ölçüm teknikleri teodolit sistemine benzer. Lazer tarayıcılar için bu türden olası hatalar şunlardır:

1. Lazer tarayıcı aletin düşey eksenini ve tarama merkezinin kayıklığı. (Merkezleştirme hatası)
2. Lazer tarayıcının dönme sırasında eksenlerdeki değişimi (Lazer tarayıcı dönen aynalarından kaynaklanan hatalar).

3. Kolimasyon (ışın yönlendirici biriminden kaynaklanan) ekseni hataları

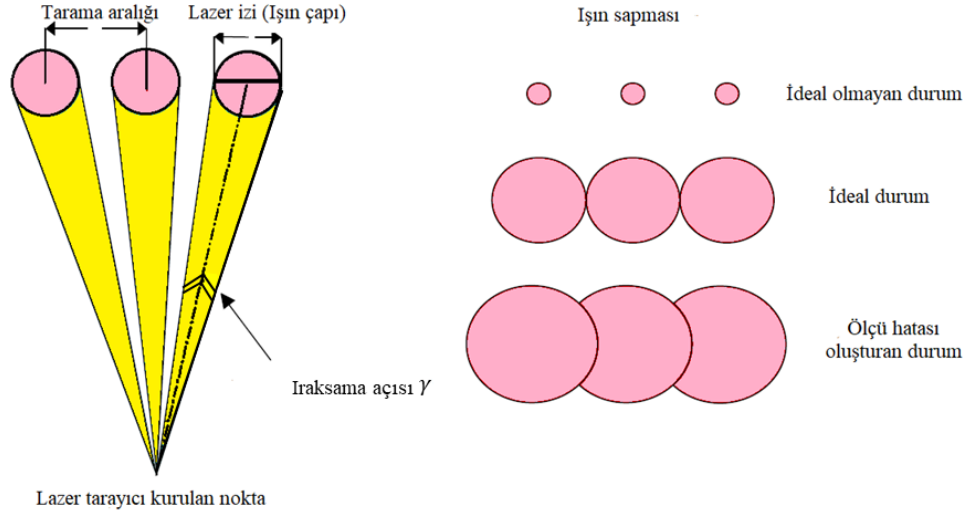
Şekil 3.15 YLT için düşey ve yatay eksenleri göstermektedir. Yersel lazer tarayıcı aletinden kaynaklanan hatalar ve bir yersel lazer tarayıcının kalibrasyonu hakkında daha ayrıntı bilgi için bkz.(Rietdorf, 2005; Schulz, 2008).



Şekil 3.15. Yersel lazer tarayıcı sistemi için dönme eksenleri (Khrachy ve ark., 2008).

- Açısal çözünürlük ve iraksama açısının etkisi

Lazer tarayıcıdan yayılan ışın demeti ile taranan yüzeyden geri yansıyan ışının gelme açısı da hata kaynağıdır. Lazer ışının taranan yüzeyde bıraktığı izin alanı arttıkça, mesafe ölçümünün hassasiyeti düşer. Bunun nedeni geri yansıyan ışın miktarının azalmasıdır. Aynı şekilde lazer ışının taranan yüzeyde bıraktığı izin alanı küçüldükçe de mesafe ölçümünün hassasiyeti düşer çünkü lazer ışının yüzeyde bıraktığı izin alanı küçüldükçe açısal çözünürlük düşer bu durumda mesafe ölçüm doğruluğunu etkiler. Lazer ışının ölçme yüzeyinde bıraktığı ışın izinin ideal durumda olması için ölçme alanına uygun açılarla tarama yapılmalıdır. Şekil 3.16'da lazer ışını sapmasının ideal olmayan durumu, ideal olan durumu ve ölçülerin hatalı olmaması için kesinlikle kaçınılması gereken durum verilmiştir.

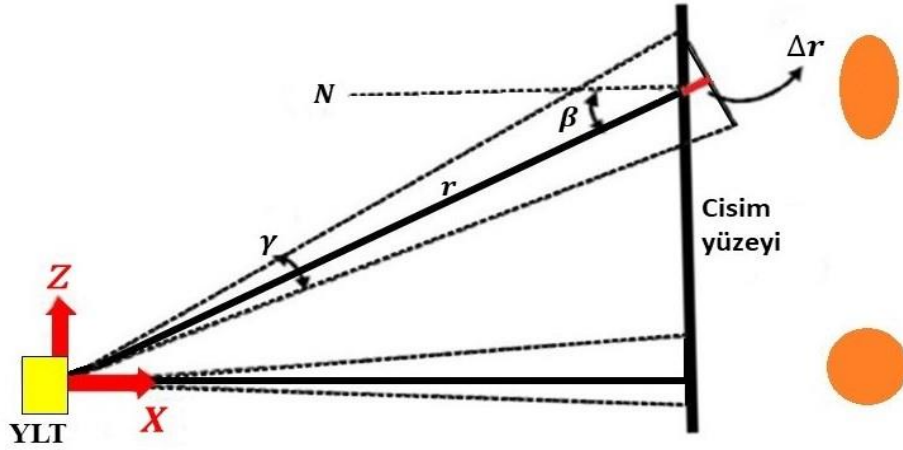


Şekil 3.16. Lazer ışını çözünürlüğünün ölçü doğruluğuna etkisi (Schlemmer, 1996).

4. Ölçme Düzenine Bağlı Hata

Tarama ışının geliş açısına hatasına bağlı hata

Işının yüzey normali ile yaptığı açı arttıkça ışın izi büyür ve yüzeyden ölçülen noktanın tespitinde belirsizlik meydana gelir (Altuntas, 2020). (Şekil 3.17) Bunun sonucunda oluşan mesafe ölçme hatası Denklem 3.6 ile ifade edilir.



Şekil 3.17. Işının yüzeye geliş açısına bağlı oluşan hata (Altuntas, 2020).

$$\Delta r = r \cdot \frac{\gamma}{2} \cdot \tan \beta \quad (3.6)$$

Burada;

Δr : Işın açısının sebep olduğu mesafe hatası

r : Alet ile taranan yüzey arasındaki mesafe

γ : Işın ıraksama açısı (radyan)

β : Işının ölçme yüzeyi normaliyile yaptığı açı

dır. Bağlıtıdan da anlaşılacağı üzere ışın yüzeye geliş açısı arttıkça hata miktarı artar. Yüzeye tam dik gelen ışınlar için bu hata oluşmaz. Bu nedenle lazer ışınları mümkün olduğunca yüzeye dik olacak şekilde cepheden taramalar yapılmalıdır.

3.6. Yersel Lazer Tarayıcı Ölçü Planlaması

Yersel lazer tarama için ölçü planlaması, taramaları olabildiğince az ölçme noktasından, en kısa sürede ve yüksek doğrulukta yapılabilmesi için tarama öncesinde yapılması gereken çalışmaları ifade eder. Burada vurgulanan tarama istasyonlarının olabildiğince az olması kriteri iş hacminin azaltılmasını ve model doğruluğunun artmasını sağlar. Planlamalar yapılırken öncelikle iç mekân ve dış mekânlar için farklı uygulama kriterleri göz önünde bulundurulmalıdır. Ölçü planlamasında dikkat edilmesi gereken diğer hususlar taramada kullanılacak lazer tarayıcı aleti, ölçme yöntemi, ölçme mesafesi, tarama noktalarının sıklığı yani tarama noktalarının yoğunluğu ve tarayıcı aletin ölçme doğruluğudur. Burada bahsedilen tarama mesafesi beraberinde ölçme hatasını, yansıma değerini ve nokta yoğunluğunu etkiler (Altuntas, 2020).

Yersel lazer tarama öncesinde aşağıda belirtilen hususlara dikkat edilmelidir (Altuntas, 2020);

- Tarama sonrasında elde edilen nokta bulutlarının hangi yöntem kullanılarak birleştirileceği önceden belirlenmeli ve ölçü sırasında tarama yapılacak istasyonlar buna bağlı olarak belirlenmelidir.
- Nokta bulutlarının birleştirilmesi için ortak tarama alanlarındaki eşlenik detay noktalarına başvurulacaksa bunun önceden düşünülerek yeterli detay içermeyen alanlarda olumsuzluk yaşamamak adına uygun ölçme istasyonları belirlenmelidir.

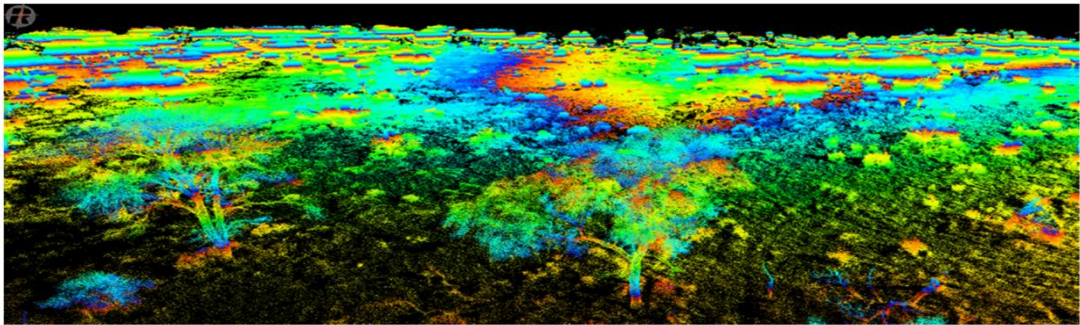
- Birbirini izleyen ölçülerle ölçülecek alan tamamen kapatılabiliyorsa (kapalı bir lup oluşturulabiliyorsa) tercih edilmelidir çünkü bu yöntem nokta bulutlarının birleştirilmesi aşamasında oluşacak hata birikmesinin 3B modele yansımalarının önüne geçer.
- Tarama mesafesi arttıkça ölçü doğruluğunun ve çözünürlüğün azalacağı unutulmamalıdır. Taramaları mümkün olduğunca her tarama istasyonu için eşit mesafeden yapmaya özen gösterilmelidir.
- Lazer ışınlarının çok büyük açılarla tarama yapması da ölçü hatalarına sebep olacaktır bunun önüne geçmek için tarama için mümkün olduğunca doğru cepheler seçilmelidir.
- Tarama sonucunda detayların birbirini gölgelemiş olması sonucuyla karşılaşmamak için ölçü planlamasında bu duruma da dikkat edilmelidir.
- Yersel lazer tarayıcı aletleri ölçme alanında sağlam bir zemine oturtulmalıdır. Çünkü herhangi bir sarsıntı, rüzgâr vb. oluşması durumunda tarayıcının bu durumdan etkilenmemesi gerekir.
- Ölçme yapılacak zamanda önemlidir. Özellikle topografik alan ve dış mekân ölçmelerinde günün hangi saatinde ölçme yapılması gerektiğine dikkat edilmelidir. Çünkü noktalara renk değeri ataması da yapılacağından ölçme alanında gölge oluşmamalıdır.
- Nokta bulutlarına jeodezik koordinatlandırma yapılacaksa bu durumda önceden belirlenmesi ve ölçü planlaması buna göre yapılmalıdır. Jeodezik koordinatlandırma için kontrol noktaları kullanılması gerekiyorsa bu kontrol noktaları ölçme alanına homojen dağılmalıdır.
- Tarama yapılacak istasyon noktalarının koordinatları yersel lazer tarayıcıya bütünleşmiş GPS ile ölçülecekse sinyal alabilecek noktalardan ölçme gerçekleştirilmelidir.

3.7. Yersel Lazer Tarama Uygulama Alanları

Yersel Lazer Tarayıcılar günümüze kadar 3B modelleme, tarihi eserlerin belgelenmesi ve mimarlık, bitki örtüsü analizi, jeomorfolojik değişikliklerin incelenmesi, arkeolojik alanların belgelenmesi, madencilik endüstri, tıp, olay yeri inceleme, kent modelleme gibi pek çok uygulama alanlarında sıklıkla kullanılmaktadır. Bunlara örnek olarak aşağıdaki çalışma örneklerini verebiliriz.

3.7.1. Bitki Örtüsü Analizinde Yersel Lazer Kullanımı

Bitki örtüsü analiz çalışmalarında optik (çoklu spektrum, yüksek spektrum) algılayıcıları, RADAR algılayıcıları, LiDAR algılayıcıları kullanılabilir (Muumbe ve ark., 2021). Çoklu spektrum verileri genellikle spektrum çözünürlüğü, bulutların engellemesi ve karışmış görüntü elemanlarının sebebiyle yeterli ölçüm performansı gösteremez (Feng ve ark., 2020; Gwenz, 2017). Yüksek spektrum verisi daha dar bant genişliği sayesinde, bitki örtüsünü ayırtmak için daha yüksek çözünürlük sağlar. Fakat, bu yöntemde geometrik (nokta bulutu yoğunluğu) çözünürlük ve spektrum bantlarının güçlü bir şekilde ilişkili olduğu kısımları çözülmesinde sorun oluşturur (Feng ve ark., 2020; Muumbe ve ark., 2021). RADAR algılayıcıları atmosferin yansıma etkilerinden bağımsız bir ölçüm sağlayabilir. Fakat, ortamdan kaynaklanan gölgeleme, ölçülen maddenin frekansıyla değişen elektromanyetik tepkisi ve sinyallerdeki yüksek gürültü sorunlarıyla karşı karşıya kalır (Sinha ve ark., 2015).



Şekil 3.18. Heterojen Savanna Ormanlarının üç boyutlu nokta kümesiyle gösterimi. Nokta Bulutu Riegl VZ 1000 tarayıcıyla Skukuza Flux Kulesinde Kruger ulusal parkı, Güney Afrika. Renk değişimi her bir 5 metre yükseklik için ayarlanmıştır (Muumbe ve ark., 2021).

Diğer ölçüm yöntemleriyle karşılaştırıldığında, YLT sistemleri yüksek çözünürlüklü üç boyutlu nokta bulutu verisi sayesinde yüksek doğrulukta ölçümü

sağlamaktadır (Beland ve ark., 2019; Lim ve ark., 2003). Uzay LiDAR sistemi geniş ölçekli biyokütle ölçümüne olanak tanımaktadır (Hill ve Broughton, 2009). Bu konuda Savanna ormanlarına odaklanan bitki örtüsü analizi yersel lazer sistemleri yardımıyla (Muumbe ve ark.,2021) tarafından gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.18). Ölçümler alınırken faz farkı ve uçuş zamanlı tarayıcılar kullanılmıştır. Buna ek olarak, çoklu yersel lazer tarama ortak ağaç özneliklerinin güvenilir bir şekilde alınmasını sağlanmıştır (Örneğin yapraktaki su yoğunluğu, ağaç gövde alanın, taç dallarındaki değişimler ve ağaç gövde büzülmesi). Bu çevreye ve ağaçlara zararsız ölçüm sayesinde saha çalışmaların elde edilebilecek veriden çok daha fazlası daha kısa bir sürede elde edilebilmiştir (Muumbe ve ark., 2021).

Li ve ark. (2022) yersel lazer tarama (YLT) verileri, orman yönetimi veya büyük otçul faaliyetlerinden etkilenen farklı meşcere tiplerinin (geyiklerin gezdiği orman, hayvanların otlattığı orman, ikincil orman ve karma orman) 3B habitat yapısal özelliklerini ölçmek için kullanmışlardır.

Jacobs ve ark. (2022) Almanya'daki meşe/karma ormanlar örneğini kullanarak, yersel lazer tarama (YLT) yoluyla tek bir ağaç düzeyinde yapraklanmanın verimli bir şekilde izlenmesi için bazı basit yeni yöntemleri göstermişlerdir. Burada, ağaç yaprak dökümünü değerlendirmek ve bunu ağaç büyümesiyle ilişkilendirmek için yeni bir yaklaşım kullanmışlardır. Mevcut YLT yaprak-odun ayırma yaklaşımlarının aksine, gövde büyümesi ve yaprak alanı birbiriyle ilişkili olduğundan, hesaplanan yapraklanma parametrelerini yıllar arası gövde büyümesine göre değerlendirmişlerdir. Yaprak dökülmesinin etkilerini göstermek için Almanya'da çingene güvesi istilasına uğramış meşe karışık ormanlarında büyük ölçekli bir sahayı deney alanı olarak kullanmışlardır. Yıllar arasında yaprak alanı ve taç perforasyonu, bazal alan artışlarıyla sırasıyla + 0.6 ve - 0.35'lik bir korelasyon hesaplamışlardır.

3.7.2. Jeomorfolojik Değişikliklerin Tespitinde Yersel Lazer Tarayıcı Kullanımı

Doğada meydana gelen jeomorfolojik değişiklikleri ve bunun sonucunda meydana gelen deformasyonları tespit etmek için yüksek yoğunluklu veri hacmine sahip yersel lazer tarayıcı nokta bulutu verilerine başvurularak yüksek doğrulukta sayısal yükseklik modelleri oluşturulabilir. Bu konuda literatürde bazı çalışmalar mevcuttur. Örneğin;

Błaszczyk ve ark. (2022) Hornsund ve Svalbard'da jeomorfolojik yapının değişimini hava fotoğraflarından elde edilen sayısal yükseklik modelleri (DEM'ler) ve yersel lazer tarayıcı nokta bulutundan elde edilen DEM'leri kullanarak incelemişler ve sayısal yükseklik modeli oluşturmak için birleştirmişlerdir. Sonuç doğruluklarını karşılaştırarak yersel lazer tarayıcı DEM'lerin doğruluğunu kanıtlamışlardır.

3.7.3. Arkeolojik Alanların Modellenmesinde Yersel Lazer Tarayıcı Kullanımı

Gelişen teknolojilerle beraber arkeolojik alanların ve arkeolojik kazılardan elde edilen objelerin dijitalleştirilerek sonsuza kadar saklanabilmesi amacıyla yersel lazer tarayıcı kullanımı yaygınlaşmıştır. YLT'lerden elde edilen 3B modeller sayesinde bir eser hakkında metrik ölçülerini, korunma durumunu ve yüzeyin özellikleri hakkında bilgi toplanabilmektedir (Alptekin ve ark., 2019). Ayrıca eserlerin özellikle zaman içerisinde kaybolan kısımlarına ilişkin alanlar tamamlanabilmekte ve eserlerin üretildikleri dönemde nasıl göründüklerine dair bilgilere ulaşılabilmektedir. Bu sayede kültürel mirasımız nesiller boyu aktarılabilir (Kaçarlar ve Hamal, 2021; Lastilla ve ark., 2019). Bu konu hakkında literatürde birçok araştırma mevcuttur. Örneğin;

Giuffrida ve ark. (2022) İtalya'nın Reggio Calabria kentinin kentsel dokusunda korunan iki arkeolojik alanın üç boyutlu araştırması ve modellenmesi için yersel lazer tarayıcı kullanmışlardır. Daha çok "Ipogeo" olarak bilinen Piazza Italia'nın yeraltı alanı ve harabeleri. S.c. odeon, via 24 Maggio'daki bir konut binasının bodrum katında yer almaktadır. Şehir merkezinde korunan diğer alanlarla karşılaştırıldığında iki örnek alanın incelemesi ortak bir unsuru paylaşıyor: Açık havada değiller, modern binalara dahil edilmişler ve bu nedenle hemen görülemiyorlar. Sahaların kendine özgü özelliklerinden dolayı, yapıların yüksek çözünürlüklü 3B modellerini üretmek için taşınabilir bir lazer tarama sisteminin kullanılması en uygun, doğru ve hızlı çözüm olarak kabul edilmiştir (Giuffrida ve ark., 2022). Araştırmada 3B modellenmesi yapılacak alanın kapalı olması diğer tekniklerin (hava-fotogrametri gibi) uygulanmasının imkânsız olması sebebiyle kullanılamamıştır. YLT tekniğinin yüksek hassasiyette veri elde etmesi ve yüksek çözünürlüğü sahip olması 3B modelleme ihtiyacının karşılanmasını sağlamıştır. Diğer tekniklerle karşılaştırıldığında YLT, metrik olarak doğru nokta bulutlarının doğrudan oluşturulmasının bir diğer avantajı olarak sunulmuştur. Şekil 3.19'da 3B modellenmesi yapılan arkeoloji alanı verilmiştir.



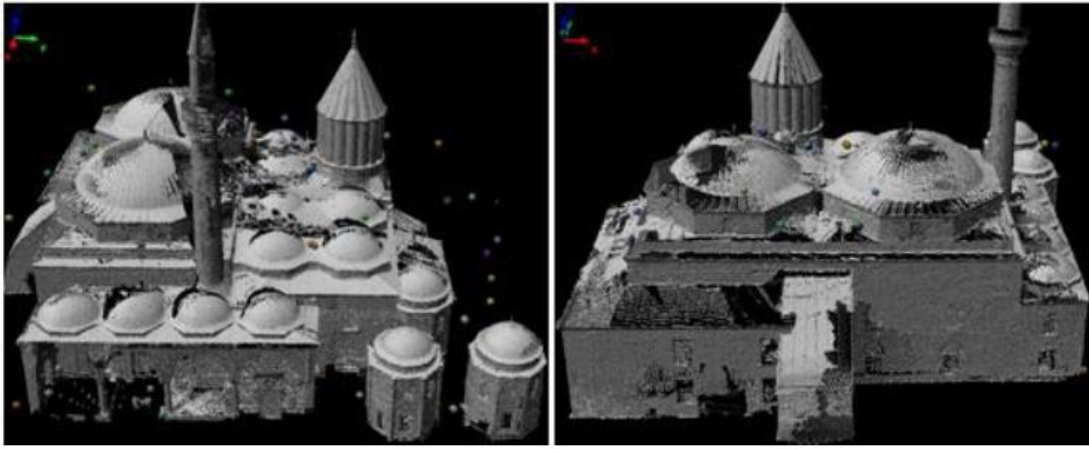
Şekil 3.19. (a) Piazza Italia'nın arkeolojik alanı; (b) lazer tarayıcı ile tarama; (c) 3B nokta bulutu (Giuffrida ve ark., 2022).

3.7.4. Kültürel Mirasın Belgelenmesinde Yersel Lazer Tarayıcı Kullanımı

Kültür varlıkları insanlığın ortak mirası olarak gelecek nesillere aktarılacak son derece önemli yapılardır (Altuntas ve ark., 2016; Büyüksalih ve ark., 2011). Bu nedenle, 3B belgeleme bu sürecin önemli bir yönüdür. Özellikle şekillerini, boyutlarını, renklerini ve anlamlarını kaydetmek, mimarların orijinal formlarını restore etmelerine ve yok olduklarında onları yeniden inşa etmelerine olanak sağlayabilir (Grün ve ark., 2004). Nesne hakkında her türlü geometrik bilgi (hacim, uzunluk, konum, dijital yükseklik modeli, kesitler) üç boyutlu (3B) dijital modellerden alınabilir (Remondino, 2011; Remondino ve Boehm, 2013). 3B modelleme, sanal gerçeklik, tarihi bina bilgi modeli uygulamaları (Murphy ve ark., 2013; Oreni ve ark., 2014), tarihi yapıların belgelenmesi, eski eserlerin fiziksel olarak kopyalanması gibi birçok amaç için uygulanmaktadır. Nesne yüzeyinden yüksek yoğunluklu mekânsal verilerin toplanmasını ve entegre edilmesini gerektirir (Kedzierski ve Fryskowska, 2015). Son on yılda, dijital fotogrametrik tekniklerin, tarama ve 3B görüntüleme sensörlerinin etkileyici gelişimi ile, mimari nesnelerin 3B mekânsal verileri çok hızlı ve hassas bir şekilde ölçülebilir. Farklı yaklaşımların analiz edildiği ve karşılaştırıldığı çok sayıda literatür yayımlanmıştır (Blais ve Beraldin, 2006; El-Hakim ve ark., 2007). Modellenen nesne veya alan geometrik yöntemlerle modellenmesi zor olan karmaşık bir yapı olduğunda yersel lazer tarama tercih edilmelidir (Altuntas ve ark., 2016). Yersel lazer tarama tekniği kültürel mirasın sayısallaştırılması için de giderek daha fazla tercih edilmeye başlanmıştır. 3B modelleme ve belgeleme projeleri ile ilgili birçok çalışma, lazer tarama tekniği tek başına veya diğer tekniklerle birlikte kullanılarak yapılmıştır (Altuntas ve ark., 2016).

Altuntaş ve ark. (2016) Konya Mevlâna Müzesinin 3B dijital modelini oluşturmuşlardır. Bina yersel lazer tarayıcı ile ölçülmüştür. Ayrıca kapalı alanın bazı

şekilleri uçuş süresi kamerası ile ölçülmüştür. Böylece tüm ölçümlere ait veri setleri birleştirilerek binanın 3 boyutlu modeli oluşturulmuştur. İç ve dış mekân ölçümleri için 2,3 cm ve 2,4 cm hassasiyetle nokta bulutu modeli oluşturulmuş ve ardından coğrafi referanslı bir sisteme kaydedilmiştir. Ayrıca doku nokta bulutundan türetilen bir ağ üzerinde haritalanarak 3 boyutlu bir sanal model oluşturulmuştur. Şekil 3.20’de Mevlâna Müzesinin dışının modeli ve Şekil 3.21’de Huzur-ı Pir bölümünde (solda, ortada) ve Mescit kapısında (sağda) bulunan Mihrapların doku haritalı 3 boyutlu modelleri verilmiştir.



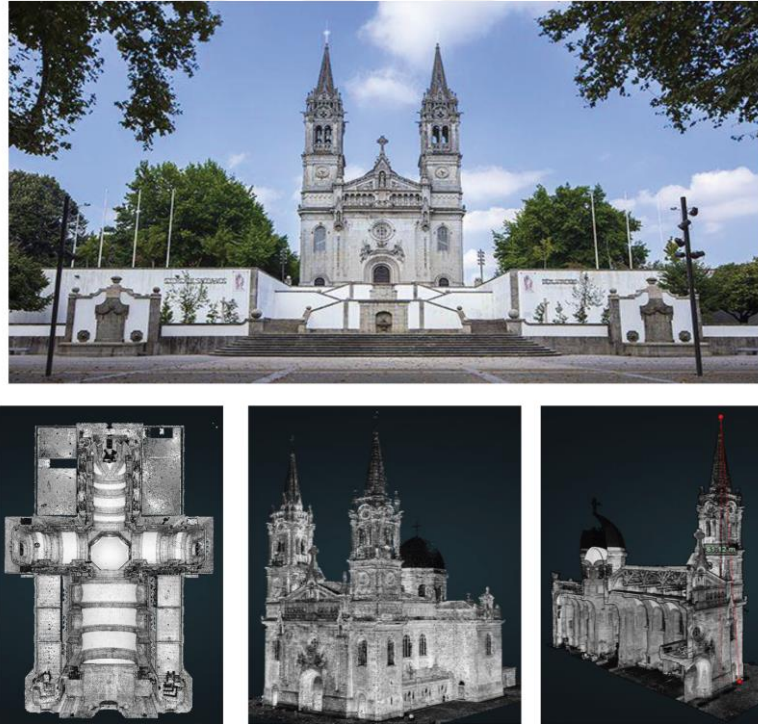
Şekil 3.20. Mevlâna Müzesi'nin dış 3 boyutlu nokta bulutu modeli. Görüntüler batı (sol) ve kuzey (sağ) taraflardan alınmıştır (Altuntas ve ark., 2016).



Şekil 3.21. Huzur-ı Pir bölümünde (solda, ortada) ve Mescit kapısında (sağda) bulunan Mihrapların doku haritalı 3 boyutlu modeli (Altuntas ve ark., 2016)

Masciotta ve ark. (2022) kültürel mirasın belgelenmesi çalışmasında yersel lazer tarayıcı nokta bulutuna 360⁰ açıyla çekilmiş fotoğrafları entegre ederek sanal bir gerçeklik turu oluşturmuşlardır. Coğrafi referanslı zenginleştirilmiş dijital modeller oluşturmak ve uygun bir önleyici koruma planının tasarımı desteklemek amacıyla her

iki teknoloji de Portekiz'deki büyük bir Neo-Manueline kilisesi ve İspanya'daki küçük bir Romanesk kilisesine uygulamışlardır. İncelenen binaların şekli ve uzantısı açısından büyük farklılıklar içermektedir. En iyi dijital ürünü en düşük maliyetle sağlamak için farklı açılardan lazer tarama ve 360° görüntüleme teknolojilerinin kullanımını ve kombinasyonunu gerektirmektedir. Şekil 3.22'de Sao Torcato Kilisesi nokta bulutundan temsili perspektifi verilmiştir. Sanal gerçeklik turu için yersel lazer tarayıcı nokta bulutundan oluşturdukları model doğruluğu ve 360° açıyla çekilmiş fotoğraflardan oluşturulan model doğruluklarını karşılaştırmışlardır. Sonuçlar yersel lazer tarayıcı nokta bulutunun daha hassas sonuç verdiğini göstermektedir ancak yöntem maliyet açısından daha pahalıdır. 360° açıyla çekilen fotoğraflar daha az maliyete sahiptir YTL'ye göre daha düşük doğruluk sağlamakla beraber kullanılabilir. Çalışma bölgesi karmaşık yapılara sahip olduğundan sanal gerçeklik turu için iki yöntemin birlikte kullanılması daha uygun olmuştur.



Şekil 3.22. Sao Torcato Kilisesi: dış görünüm (üstte) ve son nokta bulutundan temsili perspektifler (altta) (Masciotta ve ark., 2022).

3.7.5. Madencilik Faaliyetlerinde Yersel Lazer Tarayıcı Kullanımı

Son yıllarda yer altı faaliyetlerinde galerilerde oluşan deformasyonların ölçülmesinde lazer tarayıcı aletlerine başvurulmaya başlanmıştır. Nokta bulutlarından oluşturulan 3B kesitler kullanılarak deformasyonlar yüksek hassasiyetle tespit

edilmektedir ve birçok araştırmaya konu olmuştur (Delaloye, 2012; Gosliga ve ark., 2006; Lemy ve ark., 2009; Lindenbergh ve ark., 2005).

Özdoğan ve Deliormanlı (2022) metalik yer altı ocağında galeri için yapılan kazı hacmini yersel lazer tarayıcı kullanarak hesaplamışlardır. Şekil 3.23'te yer altı galerisi yersel lazer tarayıcı ölçümü verilmiştir.



Şekil 3.23. Yer altı galerisi YLT ölçümü (Özdoğan ve Deliormanlı, 2022)

3.7.6. Endüstriyel Uygulamalarda Yersel Lazer Tarayıcının Kullanımı

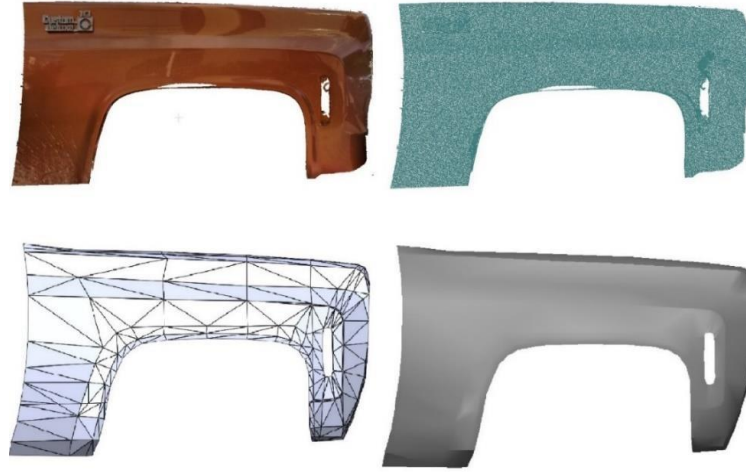
Endüstriyel uygulamalar; bir makine, makinenin parçalarını veya bir nesneyi geliştirmek, çoğaltmak, çalışma prensiplerini anlamak ve bu makineleri parçalara ayırıp tekrar birleştirmek bir bütün elde etmek olarak tanımlanabilir. Var olan bir nesneyi yeniden üretebilmek veya geliştirebilmek amacıyla ürünün 3B sayısal tasarım bilgilerinin elde edilmesi gereklidir (Fidan ve ark., 2022). Teknik çizimler ile bu nesnelerin geometrik özelliklerini ortaya çıkarmak ve 3B CAD modelini yaratmak bazı durumlarda güç olabilmekte bu da üretim ve imalatta aksamalara yol açabilmektedir. Bu sebeple üreticiler ve tasarımcılar, nesnelere iki boyutlu ekranlarda düşük ölçekte görüntülemekten ziyade yüksek çözünürlüklü ve ölçekli bir şekilde değerlendirmeye daha çok önem vermektedirler (Fidan ve ark., 2022). Son on yıldan itibaren endüstriyel uygulamalarda; fiziksel nesne veya makinelerden edinilen nokta bulutlarından, 3B modellerden ve 3B katı model verilerinden yararlanmaktadır. Tüm bunlar için LiDAR teknolojisine (YLT'lere) başvurulmaktadır. Endüstriyel uygulamalarda YLT kullanımı için bazı örnekler şu şekildedir;

Burdziakowski ve Tysiac (2019), yaptıkları çalışmada yersel lazer tarama yöntemini fotogrametrik yöntemle bütünleşik olarak kullanarak Gemilerin üç boyutlu modellemesi üzerine çalışmıştır. Elde edilen bulgular yöntemlerin tek başına 3B modelleme için yeterli olmadığı ancak birlikte kullanılması durumunda yeterli bilgi yoğunluğunu sağladığı görülmüştür.

Fidan ve ark. (2022), yaptıkları çalışmada yersel lazer tarayıcı kullanarak klasik bir otomobilin 3B modellemesini amaçlamışlardır. Elde edilen 3B nokta bulutu verilerini kullanarak otomobilin kaporta parçalarının çizimlerini tamamlayarak tersine mühendislik çalışmalarında kullanılabilirliğini tartışmışlardır. Otomobile ait nokta bulutu görüntüleri Şekil 3.24'te, otomobilin kaporta çizimi Şekil 3.25'te verilmiştir.



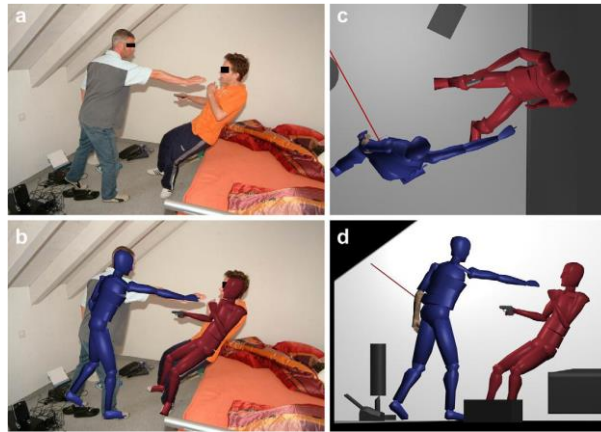
Şekil 3.24. Otomobilin nokta bulutu görüntüsü (Fidan ve ark., 2022).



Şekil 3.25. Otomobilin sağ ön çamurluğuna ait bilgisayar destekli çizim (Fidan ve ark., 2022).

3.7.7. Olay Yeri İnceleme Çalışmalarında Yersel Lazer Tarayıcı Kullanımı

Trafik kazaları, intihar veya adli olgularda olay yerinin araştırılması çalışmalarında yersel lazer tarayıcı kullanılarak 3B ölçü verisi oluşturulur. Oluşturulan bu 3B modeller mahkemelerde delil olarak kullanılır. 3B nokta bulutu verileri kombine birleştirilerek ölen kişinin vücut yüzeyinde oluşan hasarın sebebi veya cinayetse olay sırasında kullanılan aleti belirlemek için kullanılmaktadır. Kaza yerinde kazanın nasıl gerçekleştiğini belirlemek için yine yersel lazer tarayıcıya başvurulur (Saritaş, 2015). Şekil 3.26'da cinayet mahalinin 3B modeli verilmiştir.



Şekil 3.26. Cinayet mahali incelemesi (Buck ve ark., 2013).

3.7.8. Tıp Alanında Yersel Lazer Tarayıcıların Kullanılması

Silahlı yaralanmalar, trafik kazaları sonucu insan kemik dokunda bıraktığı hasarın veya kemik kırıklarının tespitinde 3B modellemeden faydalanılır. Şekil 3.27’de ateşli silahla yaralanma sonucu kafatasında meydana gelen hasarın 3B modellemesi verilmiştir.

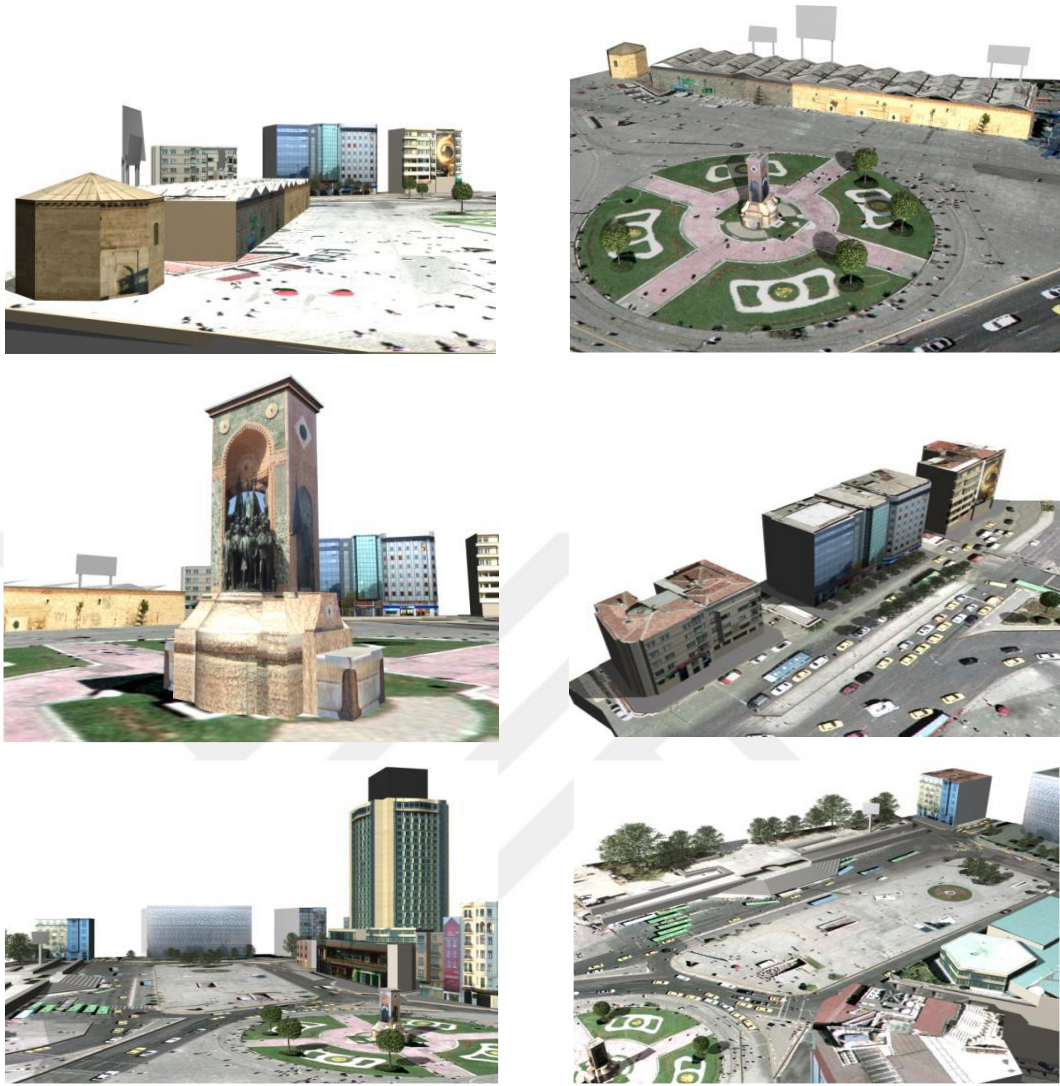


Şekil 3.27. 3B kafatası modellemesi (Saritaş, 2015).

3.7.9. Kent Modelleme Çalışmalarında Yersel Lazer Tarayıcı Kullanımı

Kent modelleri bir yerleşim yerinin turistlere veya farklı illerden gelen insanlara kentin tanıtılmasında, navigasyonun etkili kullanılmasında v.b. farklı uygulamalarda sıklıkla kullanılmaktadır. Ancak çarpık kentleşme ve olumsuz çevre şartları 3B veri elde edilmesinde teknolojinin kullanılmasını kısıtlayabilmektedir. Tüm bunlar neticesinde yersel lazer tarama teknolojisi sağlamış olduğu avantajlar sayesinde sıklıkla başvurulan yöntem haline gelmiştir (Fidan ve Fidan, 2021).

Kent modelleme çalışmalarında da yersel lazer tarama yöntemine başvurulur. Şahin (2011) doktora çalışmasında İstanbul Taksim Meydanı ve çevresinin kent modelini yersel lazer tarama ve fotogrametrik yöntemi bir arada kullanarak hazırlamıştır. Tez çalışması kapsamında ana koordinat sistemi için altlık olarak 1/1000 ölçekli sayısal haritalar kullanılmış, betonarme binalarda yersel lazer tarayıcıları binaların yüksekliklerini belirlemek için kullanılmıştır. Camlı binalarda ise yersel fotogrametri tekniğine başvurulmuştur. Binalar; model üzerine kaplanacak raster veriler ise hava fotogrametrisi ve yersel fotogrametrik görüntülerden elde edilmiştir. Şekil 3.28’de çalışma sonucunda oluşturulan kent modeli verilmiştir.

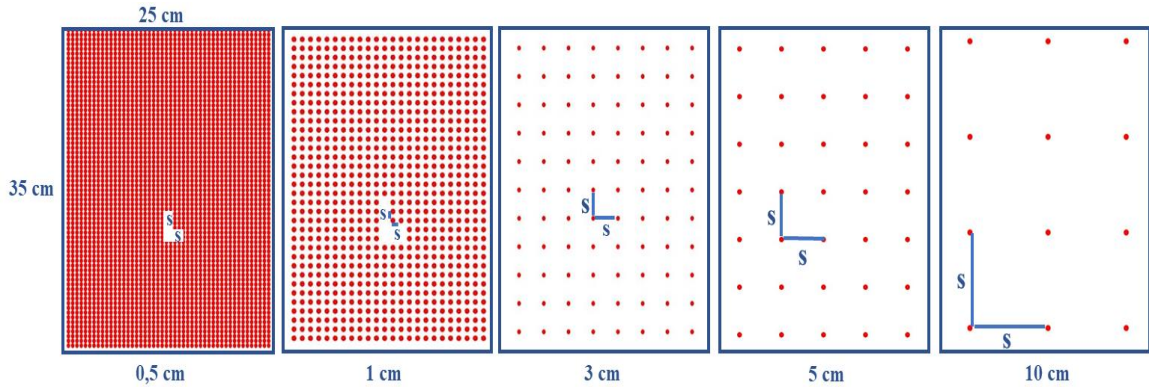


Şekil 3.28. İstanbul Taksim Meydanı Kent modelinin üç boyutlu modelden görünüşü (Şahin, 2011).

3.8. Nokta Bulutu Yoğunluğu

Tarayıcı alet merkezli bir koordinat sisteminde ölçme alanın veya herhangi bir objenin mekânsal dağılımının anlaşılmasını sağlayan XYZ koordinatları bütünü nokta bulutunu ifade eder. Nokta bulutu ölçme alanını 3B olarak temsil eden milyonlarca noktadan oluşur. Nokta bulutları farklı nokta sıklıklarında oluşturulabilir. Tarama nokta sıklığı (taranan noktalar arası mesafe) nokta bulutunun yoğunluğu olarak ifade edilir. Nokta bulutu yoğunluğu nokta bulutu birleştirme yöntemlerinin (otomatik veya manuel eşleme) doğruluğunu etkiler. Nokta yoğunluğu fazla olan nokta bulutlarında noktalar arasındaki mesafe yakın olduğundan eşlenik noktaları seçmek kolaydır. Nokta yoğunluğu

az olan nokta bulutlarında ise noktalar arasındaki mesafe arttıkça hem detay noktası seçmek zorlaşır hem de iki nokta bulutunda da aynı eşlenik noktayı seçmek mümkün olmayabilir. Tüm bunlar nokta bulutu birleştirme sonuç doğruluğunu düşürebilir veya nokta sıklığının az olması durumunda nokta bulutunu birleştirmek için yeterince eşlenik nokta bulunamayabilir (Şekil 3.29).



Şekil 3.29. Farklı nokta yoğunluklarındaki nokta bulutlarının eşlenik nokta seçimine etkisi

3.9. Nokta Bulutlarının Birleştirilmesi

Nokta bulutlarının birleştirilmesi konusu geçmişte olduğu gibi günümüzde de önemli bir araştırma konusudur. Yersel lazer tarayıcıları farklı ölçme istasyonlarından elde ettiği nokta bulutlarının birleştirilmesi 3 boyutlu modellemenin en önemli işlem adıdır. Bir yüzeyin ya da binanın 3B modelinin oluşturulması için genellikle birden fazla ölçme istasyonundan taramalar gerçekleştirmek gerekir. Her bir ölçme istasyonundaki tarama alet merkezli yani lokal koordinatlara sahiptir. Bu lokal koordinatlara sahip farklı ölçme verileri tek bir koordinat sisteminde birleştirilmesi gerekir. Genel olarak ilk ölçme noktasından alınan nokta bulutu verisi referans seçilerek diğer taramalar seçilen referans nokta bulutu koordinat sistemine dönüştürülerek birleştirilir. Bir nokta bulutunun başka bir koordinat sistemine dönüşümü 3B dönüşüm ile gerçekleştirilir.

Nokta bulutlarının tek bir referans koordinat sisteminde birleştirilmesi için birçok yöntem geliştirilmiştir, bu yöntemleri genel olarak ikili ve global birleştirme, manuel ve otomatik birleştirme olarak iki başlık altında toplayabiliriz. İkili birleştirme yönteminde nokta bulutları art arda birleştirilir ve her birleştirme sonucunda dönüşümden dolayı hata miktarı artar. Global birleştirmede ise tüm nokta bulutları için dönüşüm parametreleri aynı anda hesaplanır. Manuel birleştirmede her nokta bulutu için eşlenik noktaların seçimi

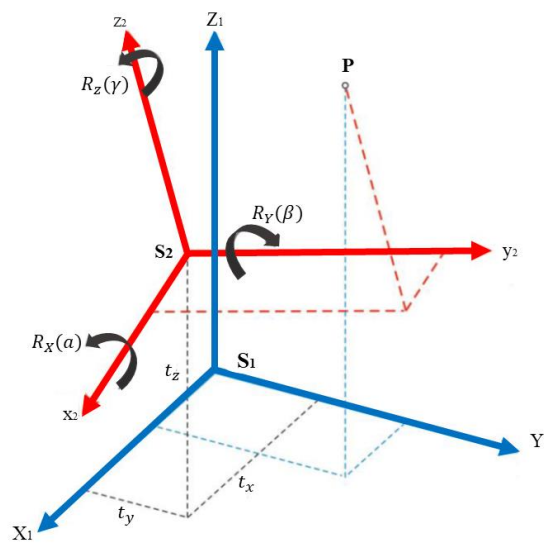
el ile yapılır. Otomatik birleştirme yöntemlerinde ise eşlenik noktalar otomatik olarak belirlenir(Altuntas, 2020).

Birleştirme yöntemlerinden bazıları aşağıda verilmiştir.

1. İteratif En Yakın Nokta (İEYN) yöntemi,
2. En küçük karelerle 3 boyutlu yüzey eşleme yöntemi,
3. Direkt jeodezik koordinatlı ölçüler yöntemi,
4. Manuel nokta seçimi yöntemi.

Nokta bulutlarının birleştirilmesinde yapay zekâ ve optimizasyon teknikleri de kullanılmaktadır (Kurban ve Beşdok, 2018). Nokta bulutlarının birleştirilmesi için günümüzde en fazla kullanılan yöntem İEYN yöntemidir (Besl ve McKay, 1992). İEYN yöntemi seçilen referans ölçüm ile model ölçüm noktası arasındaki Öklid mesafesini hesaplayarak dönüşüm parametresini elde eder. İEYN yöntemi detaylı olarak Bölüm 3.4.1.'de incelenmiştir.

Jeodezi ve fotogrametride bir koordinat sisteminden diğerine geçmek için günümüzde en sık kullanılan yöntem 3 boyutlu, 7 parametrelilik benzerlik (Helmert) dönüşümüdür (Kraus, 2007). Belirli bir koordinat sisteminde yer alan 3B noktaların bir araya gelmesiyle oluşan nesnelerin geometrisini benzerlik kurallarını gözeterek başka bir koordinat sistemine oturtulmasına Helmert veya benzerlik dönüşümü denir. Geometrik şekiller benzerliklerini koruduklarından açılar aynı kalır (Kraus, 2007). Üç boyutlu dönüşüm parametrelerinin kartezyen sistemde gösterimi Şekil 3.30'da verilmiştir.



Şekil 3.30. Üç boyutlu dönüşüm (Güllü ve ark., 2018'den uyarlanmıştır.)

Koordinatları verilen n ortak noktaya sahip iki farklı koordinat sistemimiz olduğunu varsayalım. Koordinat sistemlerinden birini sabit (s_1), diğerini de hareketli (s_2) olarak kabul edelim. Yersel lazer tarayıcılar ölçme alanını gerçek boyutuyla tasvir ettiğinden ölçek faktörünü de 1 kabul ederiz. Bu durumda hareketli koordinat sisteminin sabit koordinat sistemine 3B benzerlik (Helmert) dönüşümü matrisi aşağıdaki gibi ifade edilir (Denklem 3.7) (Kraus, 2007).

$$s_1 = \lambda R s_2 + t \quad (3.7)$$

$$\begin{bmatrix} X_i \\ Y_i \\ Z_i \end{bmatrix} = \lambda \cdot R \cdot \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} t_x \\ t_y \\ t_z \end{bmatrix}$$

Burada,

$s_1 = [X_i, Y_i, Z_i]^T$ Sabit kabul edilen noktanın koordinatları,

$t = [t_x, t_y, t_z]^T$ Bilinmeyen ötelenme miktarı,

$\lambda =$ Bilinmeyen ölçek faktörü (Ölçek faktörü 1 kabul edilir.),

$R(\alpha, \beta, \gamma) =$ Üç ayrı dönme matrisinin çarpımı olan toplam dönme matrisini,

$s_2 = [x_i, y_i, z_i]^T$ Hareketli noktanın koordinatlarını gösterir.

R Dönme matrisi z, y, x eksenleri etrafında dönüşler için ardışık olarak üç bağımsız ve bilinmeyen α, β, γ açılarını kullanır.

$$R(\alpha, \beta, \gamma) = R_1(\alpha)R_2(\beta)R_3(\gamma) \quad (3.8)$$

$$R = \begin{bmatrix} \cos\gamma & \sin\gamma & 0 \\ -\sin\gamma & \cos\gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos\beta & 0 & -\sin\beta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\beta & 0 & \cos\beta \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\alpha & \sin\alpha \\ 0 & -\sin\alpha & \cos\alpha \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

$$R = \begin{bmatrix} \cos\beta \cdot \cos\gamma & \cos\alpha \cdot \sin\gamma + \sin\alpha \cdot \sin\beta \cdot \cos\gamma & \sin\alpha \cdot \sin\gamma - \cos\alpha \cdot \sin\beta \cdot \cos\gamma \\ -\cos\beta \cdot \sin\gamma & \cos\alpha \cdot \cos\gamma - \sin\alpha \cdot \sin\beta \cdot \sin\gamma & \sin\alpha \cdot \cos\gamma + \cos\alpha \cdot \sin\beta \cdot \sin\gamma \\ \sin\beta & -\sin\alpha \cdot \cos\beta & \cos\alpha \cdot \cos\beta \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

Bu çalışmada nokta bulutlarının birleştirilmesi için dört farklı yonteme başvurulmuştur. Bu yöntemler sırasıyla iteratif en yakın nokta yöntemi, yansıma görüntüsünden seçilen eşlenik detay noktalarıyla nokta bulutlarının birleştirilmesi, nokta

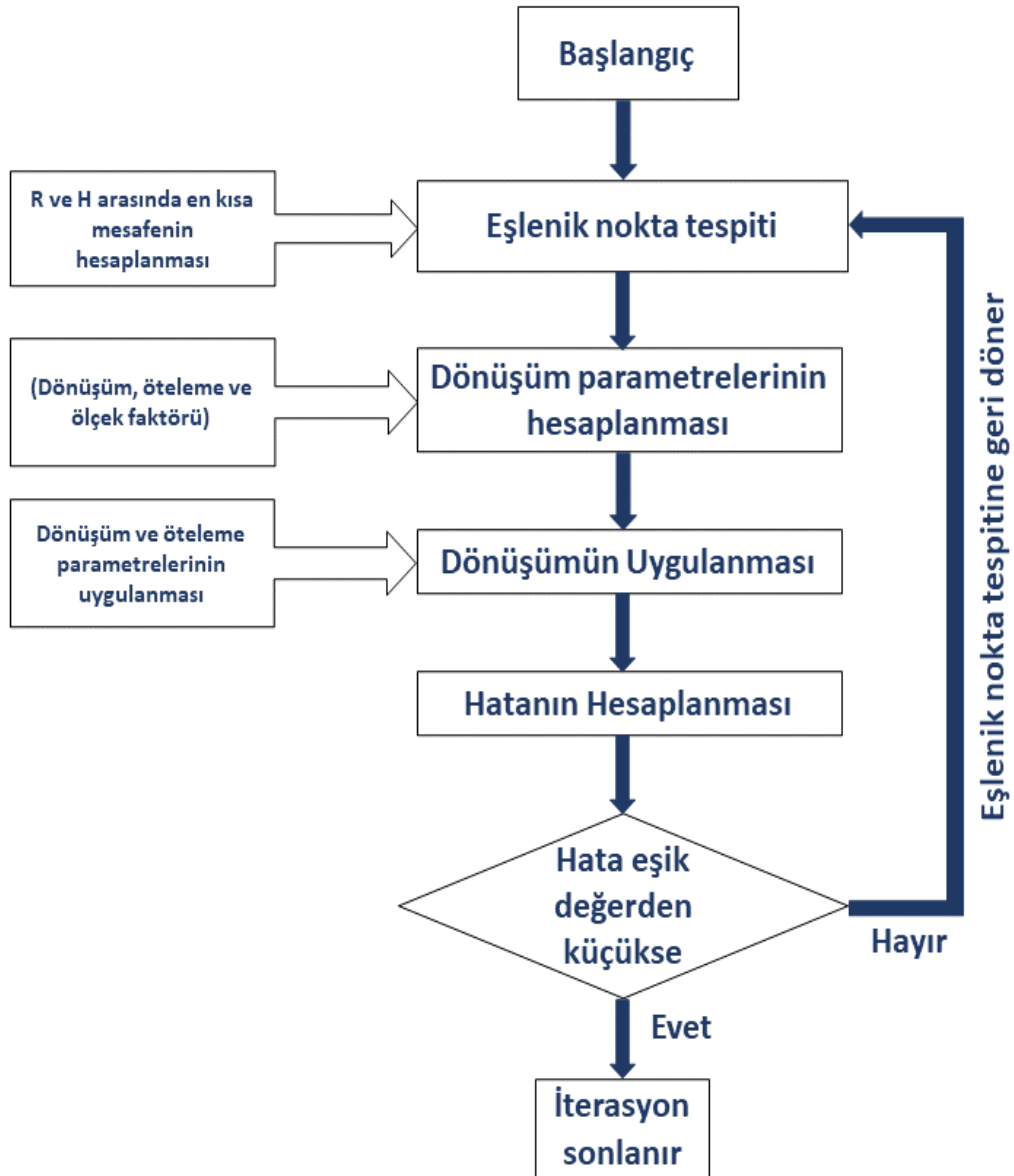
bulutundan seçilen hedef işaretli kontrol noktalarıyla nokta bulutlarının birleştirilmesi ve nokta bulutundan seçilen eşlenik detay noktalarıyla nokta bulutlarının birleştirilmesi. Bu çalışmada kullanılan birleştirme yöntemleri aşağıda detaylandırılmıştır.

3.9.1. İteratif En Yakın Nokta (İEYN) Yöntemi

İEYN yöntemi, sabit kabul edilen (referans) nokta bulutu ile hareketli kabul edilen (hedef) nokta bulutunun eşlenik noktaları arasındaki en kısa Öklid mesafesini kullanarak dönüşüm parametresi hesaplayan bir nokta bulutu eşleştirme algoritmasıdır. Yöntem her iterasyonda, sabit kabul edilen nokta bulutundaki her nokta için hareketli nokta bulutundaki en yakın eşlenik noktasını bulmaktadır. Daha sonra bu eşleşmiş noktaları kullanarak yeni bir dönüşüm parametresi hesaplamaktadır. Hesaplanan dönüşüm parametreleri belirli bir eşik değerin altında kalana kadar algoritma iterasyon yapmaya devam etmektedir (Şekil 3.31). Belirlenen eşik değerin altına düşüldüğünde iterasyon tamamlanmaktadır (Altuntaş, 2012; Besl ve McKay, 1992).

İteratif en yakın nokta yönteminde birleştirilmesi yapılacak iki nokta bulutu arasındaki dönüşüm parametrelerinin hesabı bindirmeli tarama alanlarındaki noktalar yardımıyla gerçekleştirilir. İEYN yönteminin iyi çalışması için uygun bir ilk dönüşümün tahmini (yaklaşık yöneltme) gereklidir. Bunun için İEYN algoritması hareketli kabul edilen nokta bulutunun tüm noktalarının sabit kabul edilen nokta bulutunun noktaları kümesine karşılık geldiğini varsayar. Yaklaşık yöneltme bilgisayarlarda etkileşimli olarak yapılabilir veya nokta bulutlarından kabaca seçilen 3 eşlenik noktayla da yaklaşık dönüşüm parametreleri hesaplanabilir. Yaklaşık dönüşüm parametrelerinin hesaplanmasının bir diğer yolu ise otomatik yöntemdir (Altuntas, 2012).

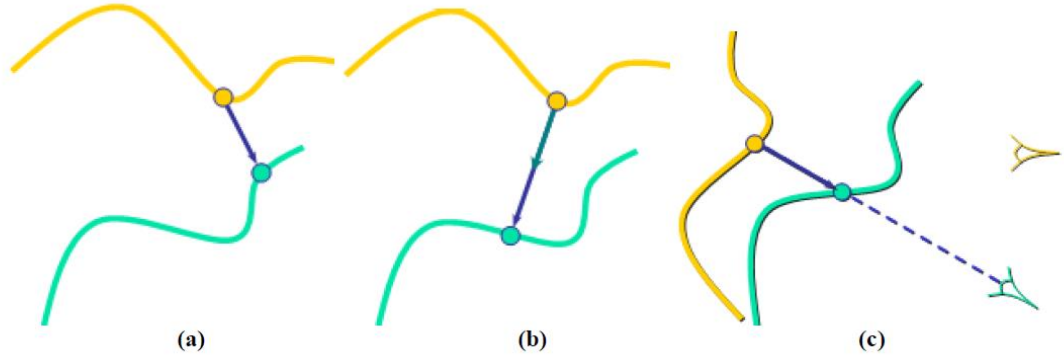
Araştırmacılar İEYN algoritmasını geliştirmek, iterasyon sayısını azaltmak veya elde edilen doğruluğu arttırmak için birçok İEYN versiyonu geliştirmiştir Bu çalışmada standart İEYN yöntemi kullanılmıştır (Besl ve McKay, 1992).



Şekil 3.31. İteratif en yakın nokta algoritması işlem adımları (Altuntaş ve Yıldız, 2008).

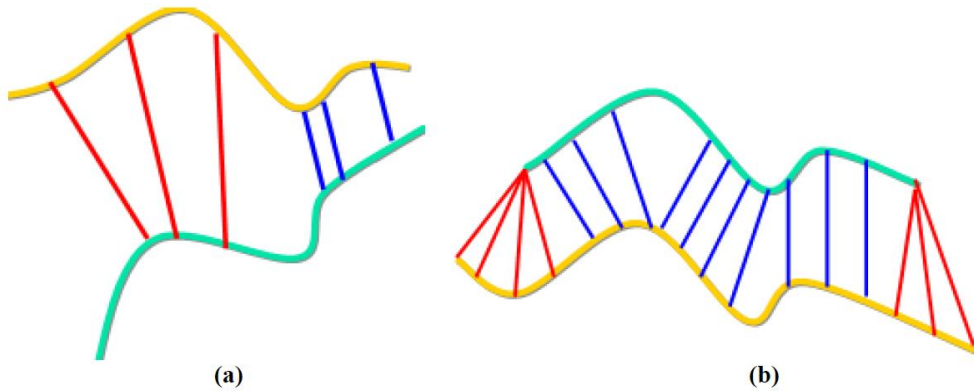
Eşlenik en yakın noktaların bulunmasında başlıca üç yöntem kullanılır. Bunlar; iki nokta bulutu arasında noktadan noktaya, noktadan yüzeye veya noktadan izdüşüm merkezine eşlenik nokta tespitidir (Altuntas, 2012) (Şekil 3.32). Bu yöntemlerin uygulanmasında $r_a(x_a, y_a, z_a)$ sabit kabul edilen nokta bulutu koordinatları, $r_h(x_h, y_h, z_h)$ hareketli kabul edilen nokta bulutundaki eşlenikleri olmak üzere en kısa Öklid mesafesi (d) denklem 3.11'deki gibi hesaplanır (Altuntas, 2012).

$$d(r_a, r_h) = \sqrt{(x_h - x_a)^2 + (y_h - y_a)^2 + (z_h - z_a)^2} \quad (3.11)$$



Şekil 3.32. İteratif en yakın nokta yöntemiyle birleştirilecek nokta bulutları arasında en yakın eşlenik noktanın bulunması (a) Noktadan noktaya, (b) Noktadan yüzeye, (c) noktadan izdüşüm merkezine (Altuntas, 2012).

Yapılan araştırmalara göre sabit nokta bulutundaki noktaların hareketli kabul edilen nokta bulutundaki karşılıklarının bulunmasında en iyi sonuncun alınmasında noktadan izdüşüm merkezine olan yöntem sağlamıştır. Yöntemde iki nokta arasındaki en yakın mesafe bulunduktan sonra bu mesafeden daha büyük mesafelerdeki eşleşmeler yanlış eşleşme olarak kabul edilir (Altuntas, 2012) (Şekil 3.33).



Şekil 3.33. İteratif en yakın nokta yöntemi kullanılarak bulunan en yakın eşlenik noktalar. (a)'da kırmızı renkle gösterilen eşleşmeler hesaplanan en kısa mesafeden daha uzak mesafedeki noktalara yapılan eşleşmeleri, (b)'de kırmızı renkle referans nokta bulutundaki bir noktanın hedef nokta bulutundaki birden fazla noktayla eşleşmesi göstermektedir. Burada kırmızı eşleşmeler görmezden gelinerek mavi renkteki eşleşmelere göre dönüşüm matrisi hesabı yapılır (Altuntas, 2012).

Hatalı eşlenik noktalar görmezden gelinerek diğer eşleşmeler dikkate alınarak dönüşüm parametreleri hesaplanır. Bu işlem iterasyon sayısı belirlenen değere ulaşıncaya veya sabit nokta bulutundaki nokta ile hareketli nokta bulutundaki eşlenik noktası arasındaki mesafe minimum oluncaya kadar iterasyon devam eder (Altuntaş, 2012).

3.9.2. Yansıma Görüntüsünden Seçilen Eşlenik Noktalarla Birleştirme

Her tarama yüzeyi birçok doğal özelliği barındırır. Bu özellikler, silindirler, düzlemler ve küreler gibi iyi bilinen geometrik 3B şekillere veya nokta bulutlarındaki kenarlar veya kesişme noktaları gibi herhangi bir özelliğe sahiptir. Bu özellik parametreleri herhangi bir hedef işareti gerektirmeksizin ardışık bindirmeli taramalarda eşlenik detaylar seçilerek ortak bir koordinat sistemine oturtulur. Ancak yansıma değeri içermeyen nokta bulutlarında detaylar seçilemez ve eşlenik noktalar belirlenemez. Bu durumda nokta bulutları birleştirilemez. Eşlenik nokta seçiminin olanaksız olduğu geometrik yüzeylerde nesne yüzeyinden geri yansıyan lazer ışının yansıma değeri kullanılarak yansıma görüntüsü oluşturulabilir ve yansıma şiddeti sayesinde detay içermeyen nesnelere gri tonlarda renklendirilerek eşlenik detay noktaları seçilme hale getirilebilir (Şekil 3.34). Böylece geometrik detayların yetersiz olduğu nokta bulutları yansıma görüntüleri kullanılarak manuel ya da otomatik yöntemlerle eşlenik nokta oluşturularak birleştirilebilir (Altuntas, 2020) (Şekil 3.35).



(a)



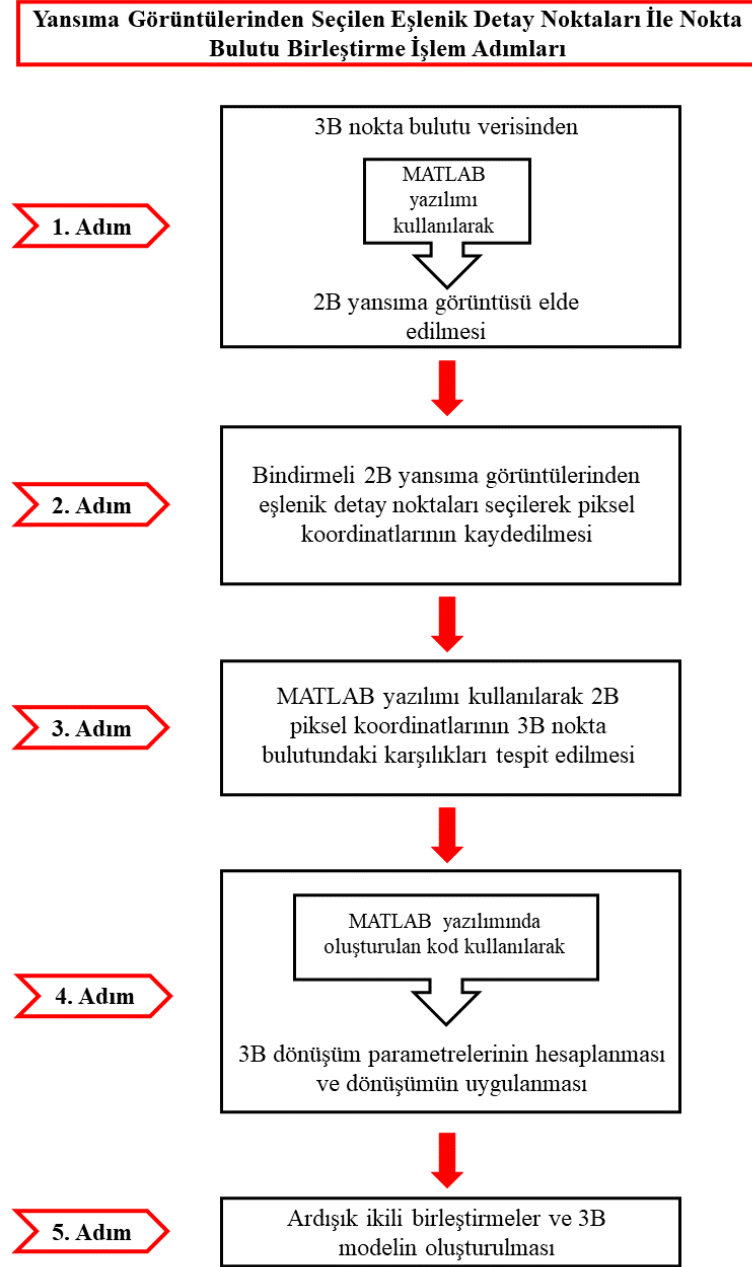
(b)

Şekil 3.34. Yansıma değeri içermeyen nokta bulutlarından eşlenik detay noktaları seçilemez. (a) yansıma değeri içermeyen nokta bulutu görüntüsü, (b) Yansıma değerlerine sahip nokta bulutundan oluşturulmuş yansıma görüntüsü.

Farklı nokta yoğunluklarına sahip nokta bulutları yansıma görüntülerinin oluşturulmasını etkiler. Örneğin 0,5 cm nokta yoğunluğuna sahip bir nokta bulutundan oluşturulan bir yansıma görüntüsü düşünelim. Bu yansıma görüntüsü için kullanılan nokta bulutu nesneden geri yansıyan tüm yansıma şiddetlerini içerdiğinden 2B yansıma görüntüsü tüm gri renk tonlarıyla renklendirilebilerek detayların tamamı seçilebilir hale gelmektedir. 10 cm nokta yoğunluğuna sahip nokta bulutunda ise nesneden yansıyan lazer ışınının yansıma oranı düşerek nesneyi tasvir edecek tüm yansıma şiddetini içermeyecektir. Bu durumda 10 cm yoğunluğuna sahip nokta bulutuyla oluşturulan yansıma görüntüsünde pikseller arasında boşluklar meydana gelecektir. Piksel boyutlarını değiştirerek bu sorunun üstesinden gelinebilir ancak bu durumda oluşturulan yansıma görüntüsünün çözünürlüğünün düşmesine sebep olarak detayların seçilmesini zorlaştırmaktadır. Yansıma görüntülerinin oluşturulması Bölüm 3.10’da anlatılmıştır. Yansıma görüntüleri kullanılarak nokta bulutlarının birleştirilmesi işlem adımları Şekil 3.36’da gösterilmiştir.



Şekil 3.35. Bindirmeli taramalara ait yansıma görüntüleri ve bu görüntülerden manuel olarak oluşturulan eşlenik noktalar.

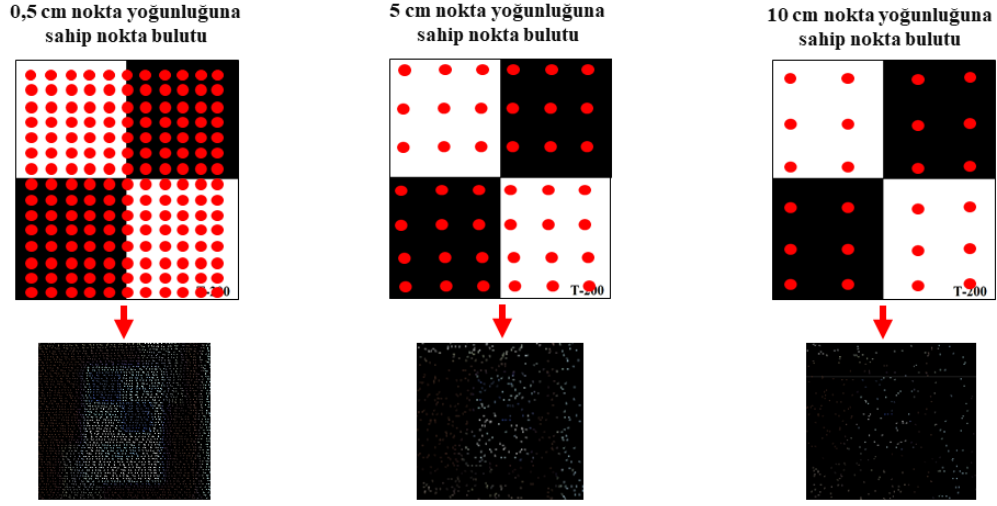


Şekil 3.36. Yansıma görüntülerinden seçilen eşlenik detay noktalarıyla nokta bulutlarının birleştirilmesi iş akış şeması

3.9.3. Nokta Bulutundan Seçilen Hedef İşaretli Kontrol Noktalarıyla Birleştirme

Nokta bulutlarının birleştirilmesi işlemi bindirmeli tarama alanlarına yerleştirilen kâğıt hedef işaretleriyle gerçekleştirilebilir. Bu işlem için nokta bulutu datasından kâğıt hedeflerin koordinat bilgilerini tespit etmek ve bir nokta bulutunu referans seçerek diğer nokta bulutu seçilen referans nokta bulutuna birleştirilir. Ancak yansıma görüntülerinde olduğu gibi nokta bulutunun yoğunluğu birleştirme doğruluğunu etkiler. Örneğin; 0,5 cm tarama nokta yoğunluğuna sahip nokta bulutunda hedef işaretli kontrol noktaları net

olarak görünür ve seçilebilir. Ancak 10 cm tarama nokta yoğunluğuna sahip bir nokta bulutunda hedef işaretli kontrol noktaları tam olarak seçilemez. Hedef işaretinin tam orta noktasına lazer ışını karşılık gelmeyebilir ve her iki nokta bulutunda kontrol noktalarının tam orta noktası seçilemeyebilir (Şekil 3.37). Bu durum nokta bulutu birleştirme doğruluğunu etkiler. Nokta bulutu yoğunluğunun çok düşük olması durumunda ise kontrol noktaları hiç seçilemeyebilir ve nokta bulutu birleştirilemez.



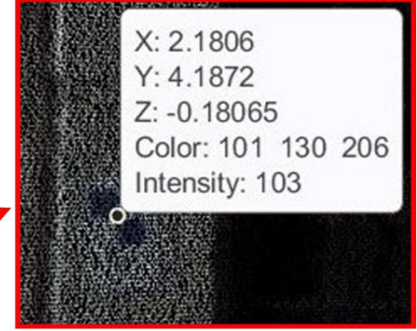
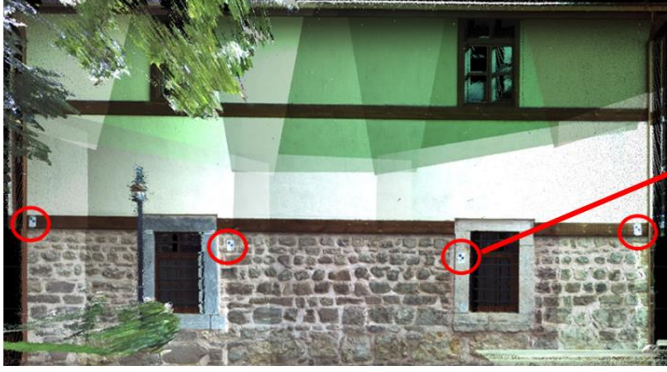
Şekil 3.37. Farklı nokta yoğunluklarında (0,5 cm, 5 cm, 10 cm) kontrol noktalarının nokta bulutu görüntüsü.

Ayrıca nokta bulutu, nokta yoğunluğu eşlenik nokta seçiminde farklı yöntemleri farklı etkileyebilir. Örneğin; manuel eşleme yönteminin kullanıldığı 10 cm nokta sıklığına sahip iki nokta bulutu düşünelim. Bu yöntemde seçilmek istenen nokta ile seçilen nokta 1. nokta bulutunda 2 cm'lik bir farkla seçilebilirken, 2. nokta bulutunda bu fark 5 cm'ye kadar çıkabilir. Bu durumda hedef işaretlerinin seçim doğruluğu birleştirme sonuç doğruluğunu etkileyecektir. Ancak kontrol noktalarının nokta bulutundan görüntü eşlemeyle seçilmesi durumunda nokta bulutunun yoğunluğu, nokta bulutu birleştirme doğruluğunu etkilemez. Çünkü hedef işaretinin görüntü eşleme ile seçilmesi durumunda tarama noktası karşılık gelmese bile hedefin tam ortası seçilir.

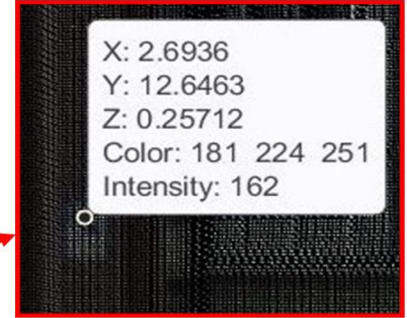
Ortak tarama alanına hedef işaretleri tesis edilmesi ekstra bir maliyet ve zaman gerektirir. Ayrıca ölçme yüzeyinin tamamını kapsayacak şekilde hedef işaretlerinin homojen dağılımı sağlanamayabilir. Örneğin bina taramalarında hedef işaretleri genellikle zemine yakın yerlerde tesis edilir.

Hoca Ahmet Fakih Camii, Selçuk Üniversitesi Teknoloji Fakültesi ve yol şevi ölçme alanlarına bindirmeli tarama alanlarına kontrol noktaları yerleştirildi ve tamamı

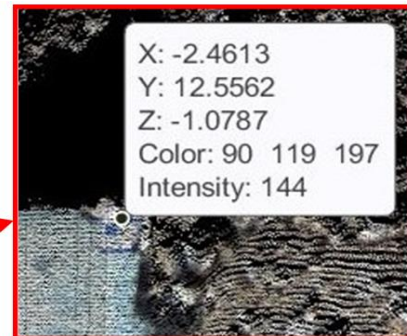
yersel lazer tarayıcıyla ölçüldü. Şekil 3.38'de (a)'da Hoca Ahmet Fakih Camii, (b)'de Selçuk Üniversitesi Teknoloji Fakültesi ve (c)'de yol şevi nokta bulutunda kontrol noktalarının görüntüsü gösterilmiştir.



(a)



(b)

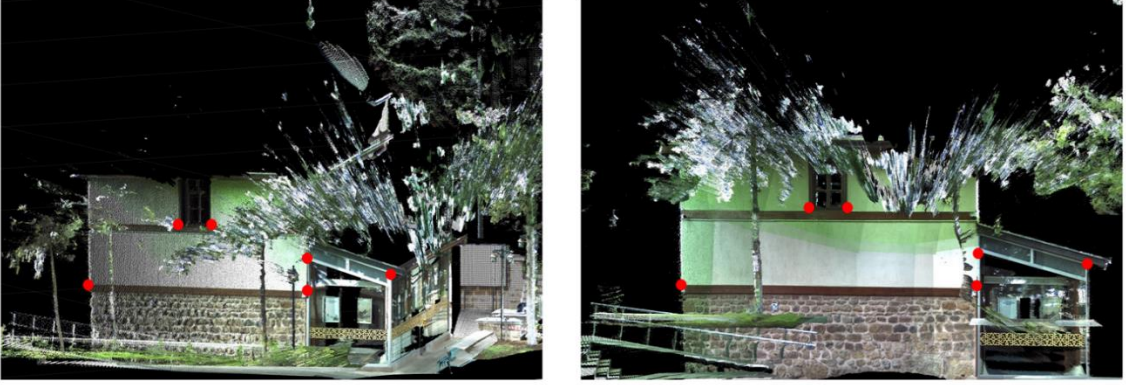


(c)

Şekil 3.38. Nokta bulutlarında kontrol noktalarının görüntüsü (a) Hoca Ahmet Fakih Camii, (b) Selçuk Üniversitesi Teknoloji Fakültesi ve (c) yol şevi

3.9.4. Nokta Bulutundan Seçilen Detay Noktalarıyla Birleştirme

Bu yöntemde nokta bulutlarının birleştirilmesi nokta bulutundan seçilen pencere kenarı, kapı kenarları vb. detayların direkt seçilmesiyle gerçekleştirilir. Bölüm 3.9.3'te nokta bulutundan seçilen hedef işaretli kontrol noktalarıyla nokta bulutu birleştirme yönteminde anlatılan tüm hususlar bu yöntem içinde geçerli olup nokta bulutu yoğunluğu diğer yöntemde olduğu gibi burada da sonuç doğruluğunu etkiler. Düşük nokta yoğunluğuna sahip nokta bulutlarında eşlenik detay seçimi oldukça zordur (Şekil 3.39).



Şekil 3.39. Bindirmeli nokta bulutlarından seçilen eşlenik detay noktaları.

3.10. 2B Yansıma Görüntülerinin Oluşturulması

YLT, her tarama noktasının koordinatlarına ek olarak cisimden yansıyan lazer ışının şiddetini (enerji yoğunluğunu) de kaydeder. Yansıma görüntüsü tarama noktalarının yansıma değerleri ile oluşturulur. Yansıma görüntüsü 3B nokta bulutu ile aynı bakış açısına sahip 2B bir görüntüdür. 3B lazer tarama nokta bulutu verisi 2B görüntü pikselleri ile temsil edilebilir. Buradan yola çıkılarak 3B nokta bulutu verisinden 2B yansıma görüntüsü Denklem 3.12 aracılığıyla elde edilir.

$$x = \frac{1}{\Delta\theta} \arctan \frac{Y}{X}$$

(3.12)

$$y = \frac{1}{\Delta\theta} \arctan \left(\frac{Z}{\sqrt{X^2 + Y^2}} \right)$$

Denklem 3.12’de x, y, tarayıcının görüş alanına karşılık gelen ve taramanın açısız çözünürlüğü tarafından belirlenen bir noktanın görüntü koordinatlarıdır. X,Y,Z 3B koordinatlarıdır ve $\Delta\theta$ taramanın açısız çözünürlüğüdür (Kang ve ark., 2009).

Pikseller, tarama noktalarının yoğunlukları ile gri tonlu olarak renklendirilir. Gri ton değeri 8 bit (0 ila 255) ya da farklı bit derinliğinde ölçeklendirilir. Yansıma değerleri ile piksellerin gri tonlu olarak renklendirilmesi iki adımda gerçekleştirilir (Altuntas, 2014);

- I. Görüntü piksellerinin en küçük ve en büyük yansıma değerleri bulunur.
- II. Belirlenen bit sayısına (n) göre yansıma değerlerine 0- 2^n arasında gri ton değeri atanır.

Her pikselin yansıma değerine karşılık gelen piksel gri ton değeri aşağıdaki denklem 3.13’le hesaplanır (Altuntas, 2020).

$$\text{Piksel gri ton değeri} = \frac{2^n(I_i - I_{min})}{I_{max} - I_{min}} \quad (3.13)$$

3.13 eşitliğinde;

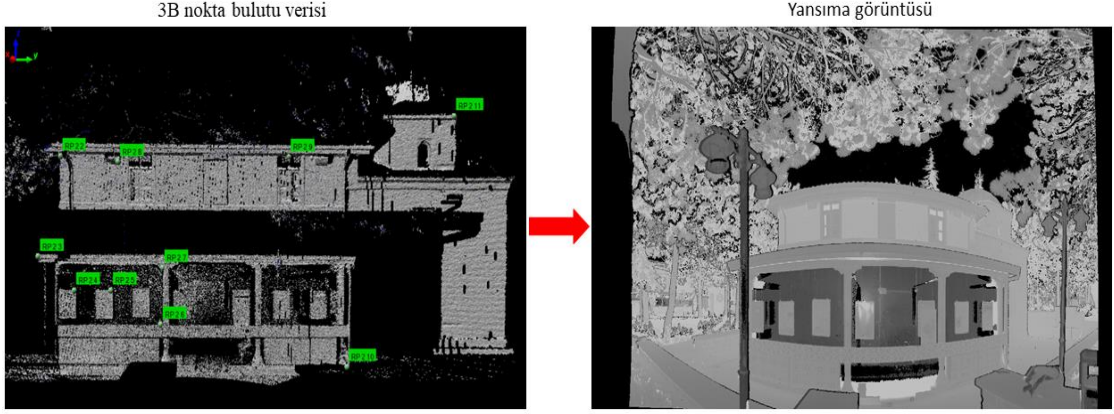
I_i : Pikselin yansıma değeri

I_{min} : Görüntü piksellerinin en küçük yansıma değeri

I_{max} : Görüntü piksellerinin en büyük yansıma değeri

n: Bit sayısı (n=8 için gri ton değeri 0-255 aralığındadır)

Bu aşamada, MATLAB yazılımı kullanılarak farklı piksel sayılarına (piksel boyutu) göre ve bit derinliğine göre gri tonlama yaparak birçok yansıma görüntüsü oluşturulmuştur ve çözünürlükleri karşılaştırılmıştır (Şekil 3.40).



Şekil 3.40. 0,5 cm nokta yoğunluklu 3B nokta bulutu verisinden oluşturulan 2B yansımaya görüntüsü

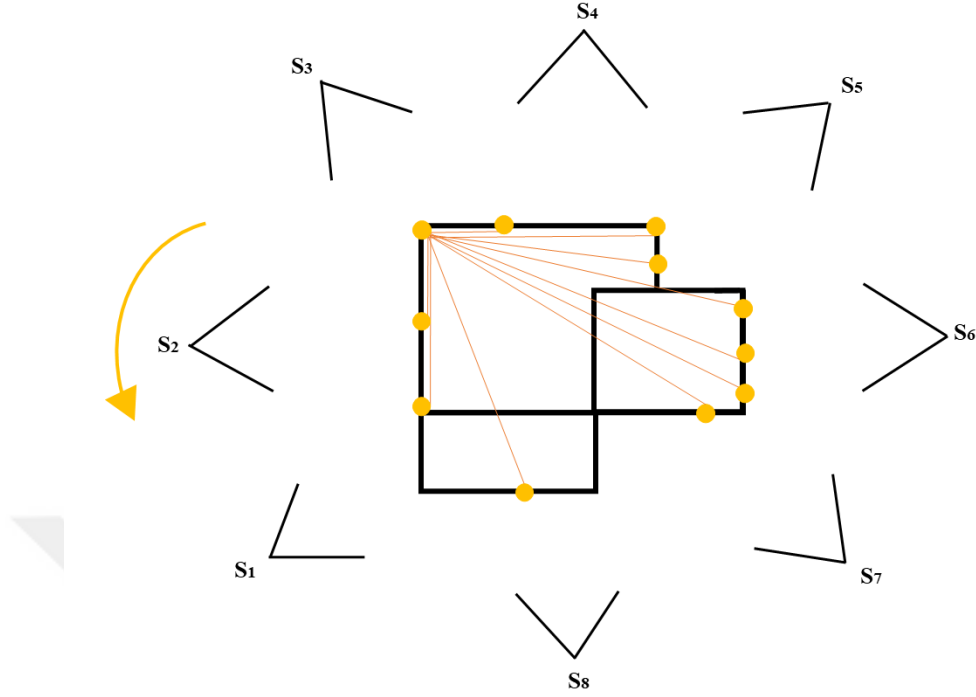
3.11. 3B Model Doğruluğunun Araştırılması

Nokta bulutlarının ikili birleştirilmesinde uygulanan birleştirme yöntemine bağlı olarak bir dönüşüm hatası oluşur. Bu hata ardışık birleştirmelerde birikir ve model doğruluğunu etkiler (Şekil 3.41). Bu birikimsel dönüşüm hatalarının modelin tamamına etkisi ve bu hatanın kabul edilir seviyede olup olmadığı şu şekilde hesaplanır; Ölçme alanında hedef işaretli kontrol noktaları tesis edilir ve total station ile koordinatları ölçülür. Kontrol noktalarının ölçülen koordinatları ile aralarındaki mesafeler hesaplanır. Hesaplanan bu mesafeler birleştirmeden sonra nokta bulutu koordinatları ile hesaplanan mesafelerle karşılaştırılır. Hesaplanan mesafelerin farkları ile elde edilen d_m model doğruluğu için bir karşılaştırma kriteridir. Bir nokta bulutu modeline ait j adet kontrol noktası ile d_m doğruluk kriteri Denklem 3.14 bağıntısı ile hesaplanır (Altuntas, 2020; Aquilera ve ark., 2009).

$$d_m = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=2}^n \frac{[(d_{ij})_{cisman} - (d_{ij})_{model}]^2}{\frac{n(n-1)}{2}}}{2}}, i < j \quad (3.14)$$

d_{ij} 'ler kontrol noktaları arasındaki Öklid mesafesidir (Denklem 3.14).

$$d_{ij} = \sqrt{(x_j - x_i)^2 + (y_j - y_i)^2 + (z_j - z_i)^2} \quad (3.15)$$



Şekil 3.41. Bindirmeli taramalar ardışık olarak birleştirilirken hata miktarı birikir ve biriken hata model doğruluğunu etkiler. Şekil 'de bir noktadan diğer noktalara olan Öklid mesafeleri örnek olarak gösterilmiştir.

3.12. Arazi Çalışması

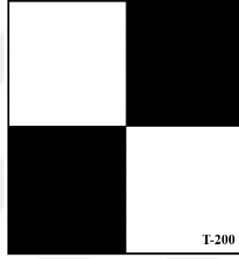
Bu çalışmada Stonex X300 yersel lazer tarayıcı kullanılarak farklı özelliklere sahip yapı ve yüzeylerde %80 bindirmeli taramalar gerçekleştirildi. Farklı geometrik yüzeyler olarak Konya Hoca Ahmet Fakih Camii, Konya Selçuk Üniversitesi Teknoloji Fakültesi ve yol şevi seçildi. Taramalar farklı nokta yoğunluklarında ve bindirmeli olarak gerçekleştirilmiştir.

3.12.1. Hoca Ahmet Fakih Camii Arazi çalışması

Hoca Ahmet Fakih Camii XIII. yüzyılda inşa edilmiş olup Konya'nın Meram ilçesinin Armağan Mahallesinde Konya Şeker Fabrikası'nın arka tarafında yer almaktadır. Camii 6 farklı yapıyı içerisinde barındırmaktadır. Bunlar; zaviye, cümle kapısı ve avlu duvarı, sebil, sarnıç, çeşme ve hazirede bulunan mezar taşları. Camii genel olarak kesme taştan inşa edilmiş olup camii duvarlarının üst kısmı ise betonarmeden

yapılmıştır. Camii 1909 yılında tadilattan geçirilmiş olup eski çatısı tek kubbeli iken günümüzde ahşaptan yapılmıştır. Çalışmamızda Hoca Ahmet Fakih Camii seçmemizde Camii'nin taş yapısıyla farklı geometrik yüzeye sahip olması ve ayrıca kültürel miras olması etkili olmuştur.

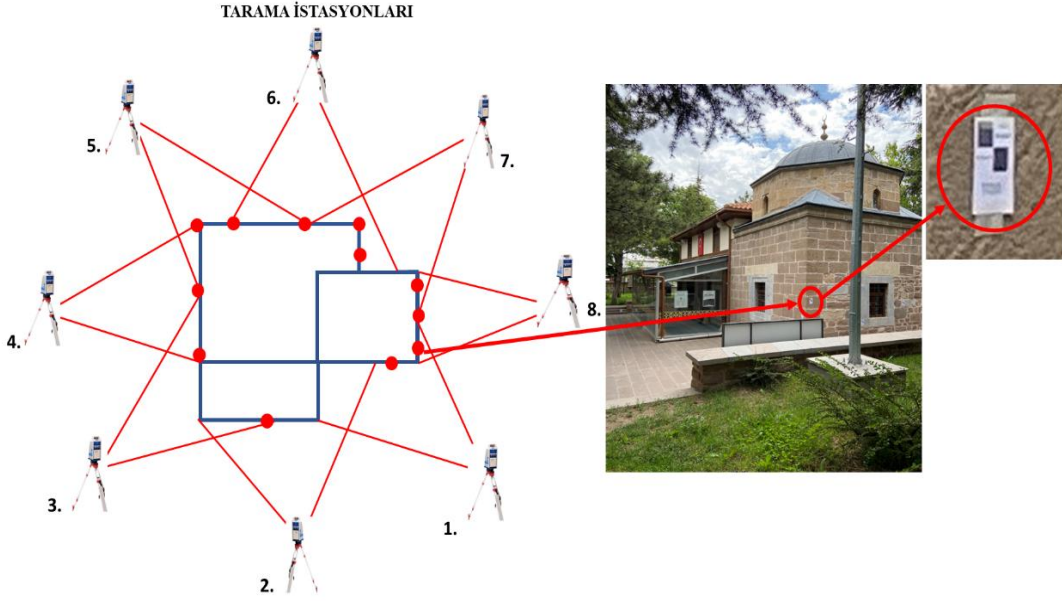
Çalışmamıza, Hoca Ahmet Fakih Camii etrafında keşif yapıp taramaların yaklaşık %80 bindirmeli olacak şekilde lazer tarayıcı kurulacak yerler belirlenerek başlanmıştır. Camii etrafına 12 adet siyah beyaz desenli kâğıt hedef işaretleri (Şekil. 3.42) bindirmeli tarama alanına denk gelecek şekilde yerleştirilmiştir (Şekil 3.43). Taramalar ortalama 15 m uzaklıktan, 0,5 cm, 1 cm, 3 cm, 5 cm ve 10 cm nokta sıklıklarında ve 8 farklı tarama istasyonundan gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.44).



Şekil 3.42. Taramalarda kullanılan kâğıt hedef işareti



Şekil 3.43. Hoca Ahmet Fakih Camii tarama öncesi yerleştirilen kâğıt hedef işaretlerini gösterir fotoğraf.

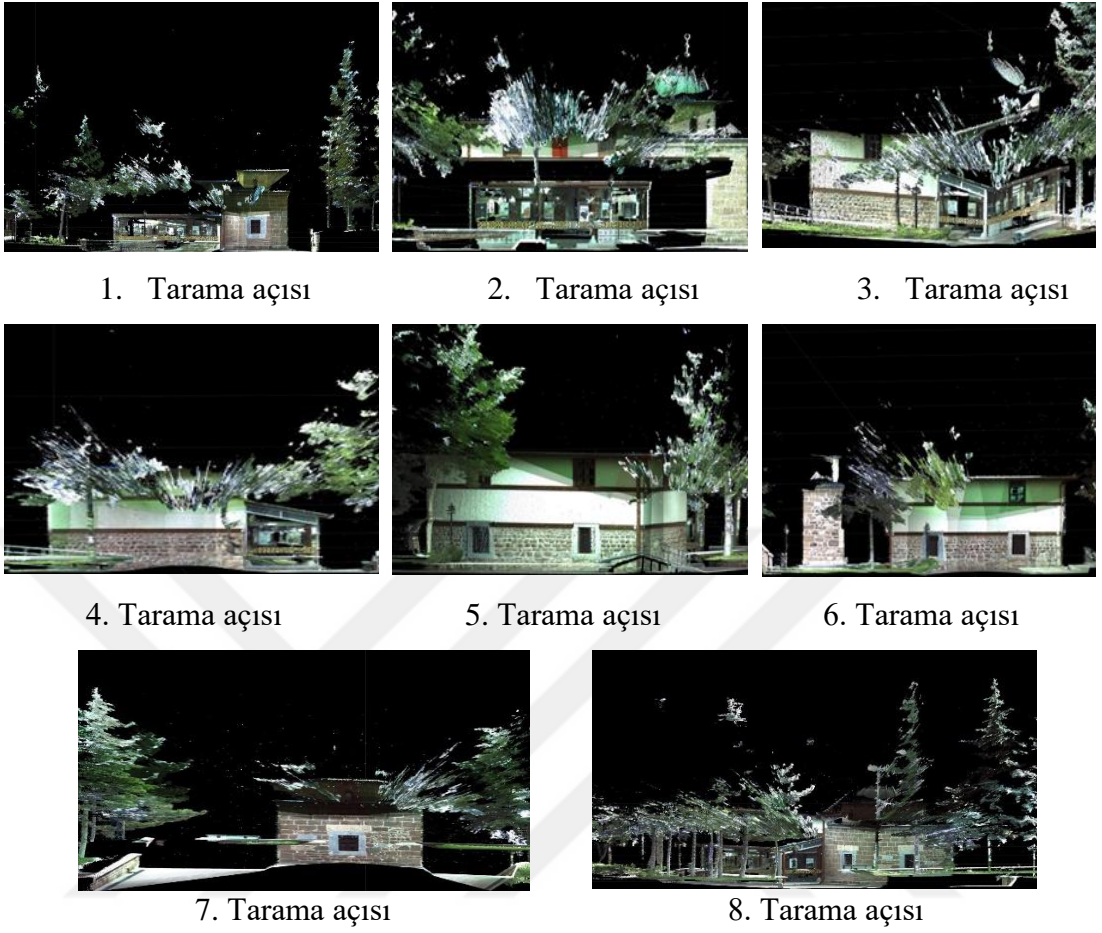


Şekil 3.44. Hoca Ahmet Fakih Camii tarama noktalarını ve bindirmeli alanları gösterir kroki. Belirtilen caminin üzerine tarama öncesi yerleştirilen kâğıt hedef ve o hedefin yakınlştırılmış hali.

İlk istasyondan başlayarak Stonex X300 yersel lazer tarayıcı aletiyle bindirmeli olarak 0,5 cm, 1 cm, 3 cm, 5 cm, 10 cm nokta sıklıkları ile taramalar gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.45). Camii'nin 3B nokta bulutu verileri yaklaşık olarak; 0,5 cm'lik nokta yoğunluğu için 6 milyon, 1 cm için 3 milyon, 3 cm için 1 milyon, 5 cm için 624 000, 10 cm için 312 000 nokta içermektedir (Şekil 3.46). Ayrıca özel kâğıt hedeflerin koordinatları lokal sisteme dayalı olarak reflektörsüz total station ile ölçülmüştür (Şekil 3.47).



Şekil 3.45. Hoca Ahmet Fakih Camii birinci tarama noktası



Şekil 3.46. Hoca Ahmet Fakih Camii'nin 8 farklı tarama istasyonundan 0,5 cm yoğunlukta nokta bulutu

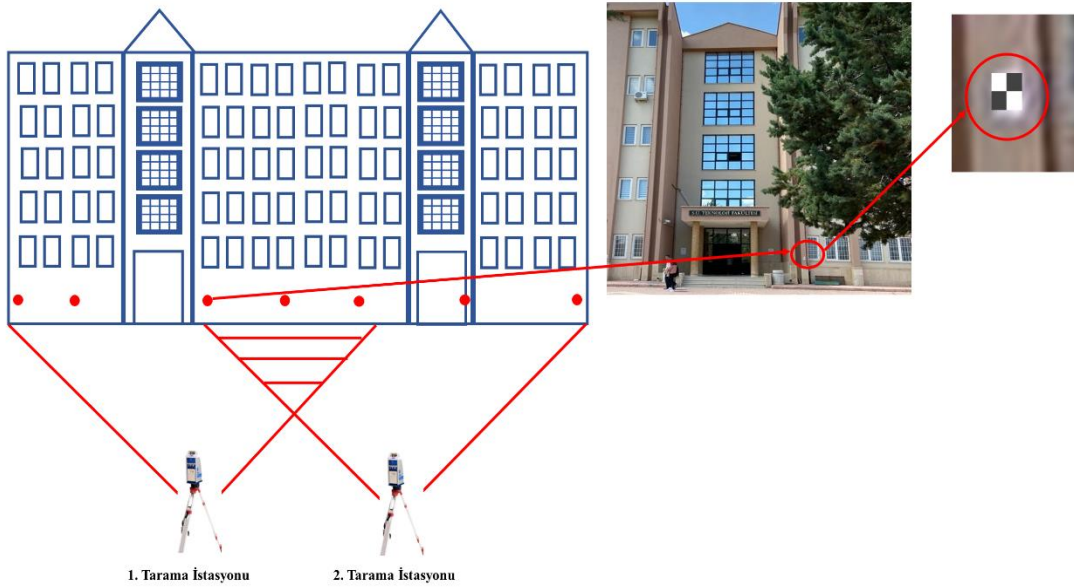


Şekil 3.47. Özel kâğıt hedef işaretlerinin koordinat okumaları lazer atımlı elektronik total station aleti ile gerçekleştirildi.

3.12.2. Selçuk Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Arazi Çalışması

Çalışmamızda bir diğer ölçme objesi olarak Selçuk üniversitesi teknoloji fakültesi tercih edilmiştir. Bu fakültenin yüzeyinde bulunan birçok cam ve pencerenin nokta bulutlarının birleştirilmesinde zorlaştırıcı etkisi söz konusudur. Ayrıca birçok pencere bulunması eşlenik detay seçimini de zorlaştırmaktadır. Renk (RGB) ya da yansımaya değerleri (I) olmaksızın bu yüzeye ait nokta bulutundan eşlenik nokta seçimi oldukça zordur. Ölçme yüzeyindeki cam ve beton yüzeylerin yansımaya özellikleri farklıdır. Bu yansımaya farkından dolayı oluşturulan yansımaya görüntüsünde eşlenik detay seçimi yapılabilmektedir.

Çalışmanın bu bölümünde fakülte etrafında keşif yapılarak tarama alanına özel kâğıt hedefler yerleştirilmiştir. 2 ayrı tarama noktasından yaklaşık 20 m uzaklıktan ardışık %80 bindirmeli olarak farklı nokta yoğunluklarında (0,5, 1, 3, 5, 10 cm) taramalar gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.48). Taramalardan renk ve yansımaya değerleri içeren nokta bulutları elde edilmiştir (Şekil 3.49).



Şekil 3.48. Selçuk Üniversitesi Teknoloji Fakültesi bindirmeli tarama alanları ve hedef işaretlerinin yerleşimini gösterir kroki. Belirtilen fakültenin üzerine tarama öncesi yerleştirilen kâğıt hedef ve o hedefin yakınlaştırılmış hali.



Şekil 3.49. Selçuk Üniversitesi Teknoloji Fakültesi tarama öncesi özel hedef işaretleri yerleştirildi ve ardışık taramalar gerçekleştirildi.

Elde edilen nokta bulutu verileri yaklaşık olarak; 0,5 cm nokta yoğunluğunda 7 milyon nokta, 1 cm nokta yoğunluğunda 3,5 milyon, 3 cm nokta yoğunluğunda 1,5 milyon, 5 cm nokta yoğunluğunda 712 000 ve 10 cm nokta yoğunluğunda 356 000 nokta içermektedir (Şekil 3.50, Şekil 3.51).



0,5 cm nokta yoğunluğundaki nokta bulutu



1 cm nokta yoğunluğundaki nokta bulutu



3 cm nokta yoğunluğundaki nokta bulutu



5 cm nokta yoğunluğundaki nokta bulutu



10 cm nokta yoğunluğundaki nokta bulutu

Şekil 3.50. Teknoloji fakültesinin 1. tarama istasyonundan 0,5 cm, 1 cm, 3 cm, 5 cm ve 10 cm nokta yoğunluklarına sahip nokta bulutları



Şekil 3.51. Teknoloji fakültesinin 2. tarama istasyonundan 0,5 cm, 1 cm, 3 cm, 5 cm ve 10 cm nokta yoğunluklarına sahip nokta bulutları.

3.12.3. Yol Şevi Arazi Çalışması

Tez çalışması kapsamında doğal cisimlerden olan yansımaları içermesi bakımından seçilen bir diğer ölçme alanı olarak yol şevi tercih edilmiştir. Yol şevinde bulunan taş, kaya parçaları, beton ve civardaki kuru bitki örtülerinin her biri farklı yansımaya özelliklerine sahiptir. Bu yüzey türlerinin yansımaya değerleri kısmen birbirine yakındır. Bu özellik hem yansımaya görüntüsü oluşturma hem de oluşturulan yansımaya görüntülerinden detay seçme işlemlerinde zorlaştırıcı etki oluşturabilir. Dolayısıyla bu yol şevi modellemesiyle önerilen birleştirme yöntemlerinin bu yüzey türlerinde de denenmesi yararlı olacağı düşünülmüştür. Yol şevinin yüksekliği yaklaşık 20 m'dir

İlk olarak tarama alanında keşif yapılarak bindirmeli tarama alanına denk gelecek şekilde özel kâğıt hedefler yerleştirilmiştir (Şekil 3.52). Yaklaşık 20 m uzaklıktan iki istasyondan %80 bindirmeli olarak taramalar gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.53). Yol şevinde de 0,5 cm, 1 cm, 3 cm, 5 cm ve 10 cm nokta yoğunluklarında 3B nokta bulutu verisi elde edilmiştir. Yol şevi nokta bulutları yaklaşık şu sayılarda 3B nokta içermektedir; 0,5 cm nokta yoğunluğu için 4 milyon nokta, 1 cm için 2 milyon nokta, 3 cm için 553 bin nokta, 5 cm için 387 bin nokta ve 10 cm için 193 bin nokta (Şekil 3.54, Şekil 3.55).

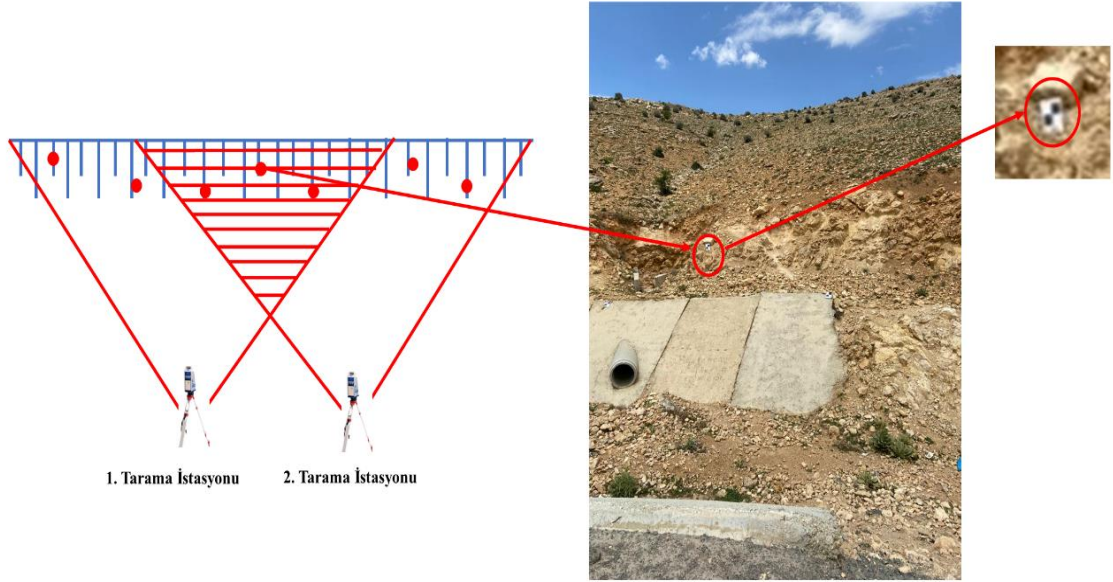


(a)



(b)

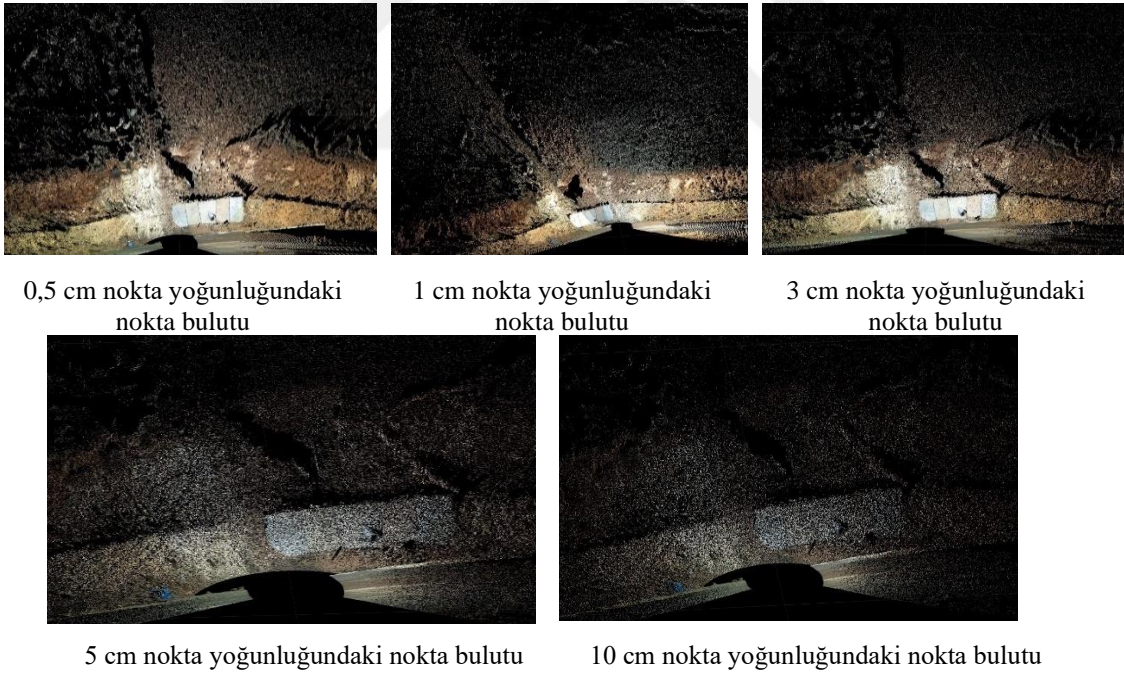
Şekil 3.52. Yol şevine tarama öncesi yerleştirilen özel hedef işaretleri.



Şekil 3.53. Yol şevi kâğıt hedeflerini ve ölçü noktalarını gösteren ölçü krokisi.



Şekil 3.54. Yol şevinin 1. tarama istasyonundan 0,5 cm, 1 cm, 3 cm, 5 cm ve 10 cm nokta yoğunluklarına sahip nokta bulutu.



Şekil 3.55. Yol şevinin 2. tarama istasyonundan 0,5 cm, 1 cm, 3 cm, 5 cm ve 10 cm nokta yoğunluklarına sahip nokta bulutu.

3.13. Stonex X300 Yersel Lazer Tarayıcı

Arazi çalışmalarında kullanılan yersel lazer tarayıcı Stonex X300'dür (Şekil 3.56). Stonex X300 lazer tarayıcı aleti ölçme alanın yansıma özelliklerini toplayabilen bir tarayıcıdır. Tarayıcıya bütünleşmiş kamerası sayesinde renk (RGB) değerlerini toplayabilmektedir. Ayrıca 360° tam panoramik görüş alanına sahip olmasından dolayı 360° tarama yapabilmektedir. Stonex yersel lazer tarayıcı aleti 1,35' yatay ve 1,35' dikey açısal çözünürlüğe sahiptir. Tarayıcının diğer teknik özellikleri Çizelge 3.2'de verilmiştir.

Çizelge 3.2. Stonex X300 yersel lazer tarayıcı aletin teknik özellikleri.

Tarayıcının Ölçme Özellikleri	
Mesafe	1,6-300 m, %100 yansıtma (açık beyaz)
Görüş alanı	360° (H)x90° (-25° ila 65°)(V)
Tarama hızı	40000 nokta/sn'ye kadar
Lazer ışını	0.37 mrad
Yatay ve Dikey tarama aralığı	39 mm x 39 mm @ 100 mm
Açısal çözünürlük	1,35' (Y) x 1,35' (D) (maksimum çözünürlükte)
Mesafe ölçme doğruluğu	< 6 mm @ 50 m – (1 sigma) < 40 mm @ 300 m
Lazer dalga boyu	905 nm (görünmez)
Entegre kameralar	10 megapiksel
Çözünürlük	360° üzerinde 120MB
Tarayıcının Özelliği	
Boyut (GxGxY)	215 mm x 170 mm x 430 mm
Ağırlık	6.15 kg/12,35 Ibs (pilsiz)
Batarya Özelliği	
Boyut (DxWxY)	42 mm x 165 mm x 120 mm
Ağırlık	0,85 kg/1,76 Ib
AC Güç Kaynağı Özelliği	
Boyut (DxGxY)	147 mm x 63 mm x 38 mm
Ağırlık	200 gR/0,441 Ib



Şekil 3.56. Stonex X300 yersel lazer tarayıcı aleti

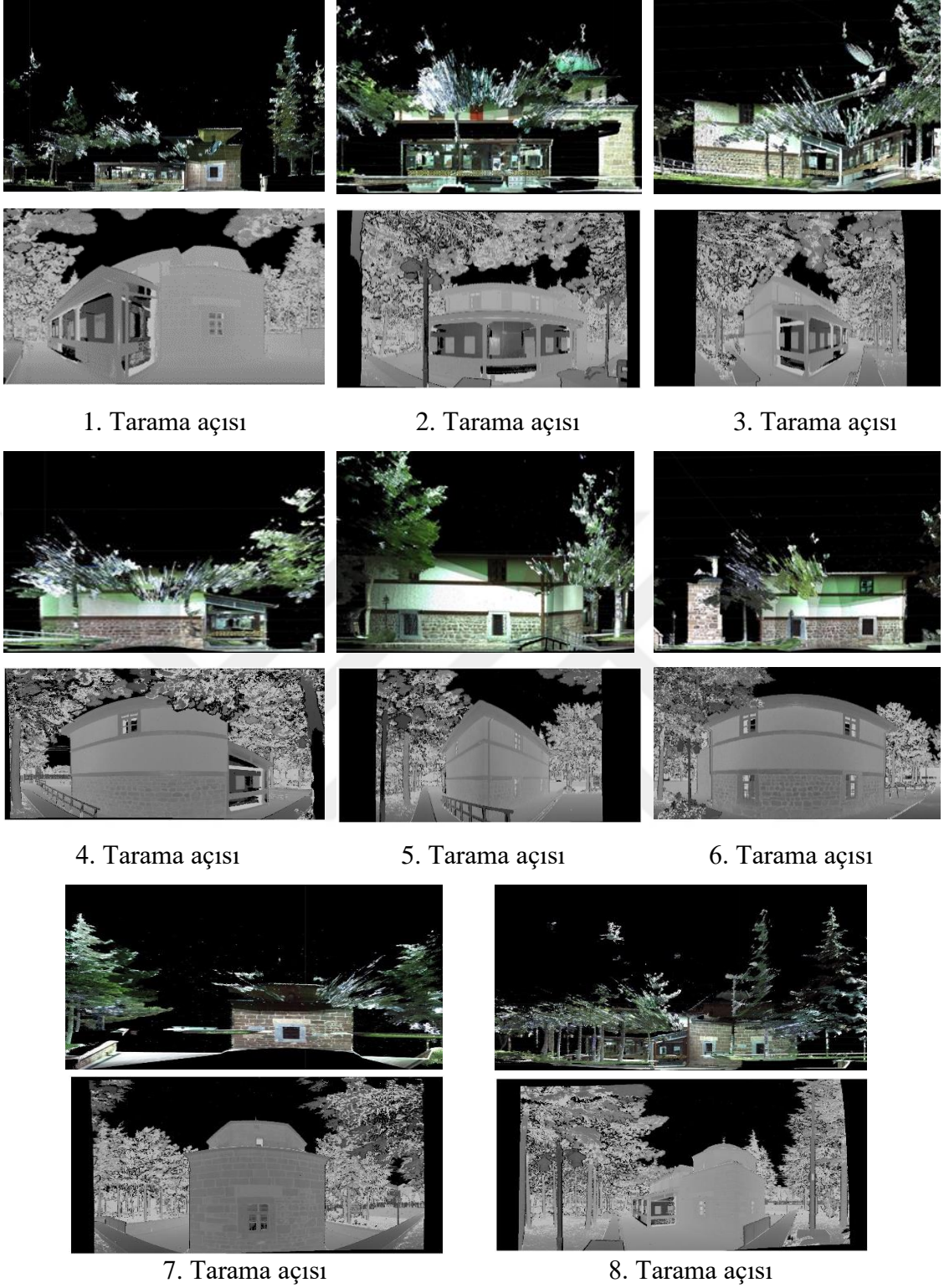
4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI

MATLAB yazılımında oluşturulan kod yardımıyla Hoca Ahmet Fakih Camii, Teknoloji Fakültesi ve yol şevine ait 0,5 cm, 1cm, 3 cm, 5 cm ve 10 cm nokta sıklıklarındaki nokta bulutlarının yansıma görüntüleri oluşturulmuştur. Yansıma görüntüleri Eşitlik 3.12 bağıntısı yardımıyla oluşturulmuştur. Elde edilen bu yansıma görüntülerinden eşlenik detay noktası seçimiyle nokta bulutları birleştirilmiştir. Nokta bulutu birleştirme sonuçları literatürde en yaygın olarak kullanılan ve yüksek doğruluğa sahip yöntem olan İEYN yöntemi doğruluğuyla karşılaştırılmıştır. Ayrıca nokta bulutundan seçilen hedef işaretli kontrol noktalarıyla ve nokta bulutundan seçilen eşlenik detay noktalarıyla da nokta bulutları birleştirilmiştir. Bu dört farklı birleştirme yönteminin sonuçları detaylı olarak karşılaştırılmıştır.

4.1. Hoca Ahmet Fakih Camii Nokta Bulutlarının Birleştirilmesi

4.1.1. Yansıma Görüntülerinden Seçilen Eşlenik Noktalarla Nokta Bulutlarının Birleştirilmesi

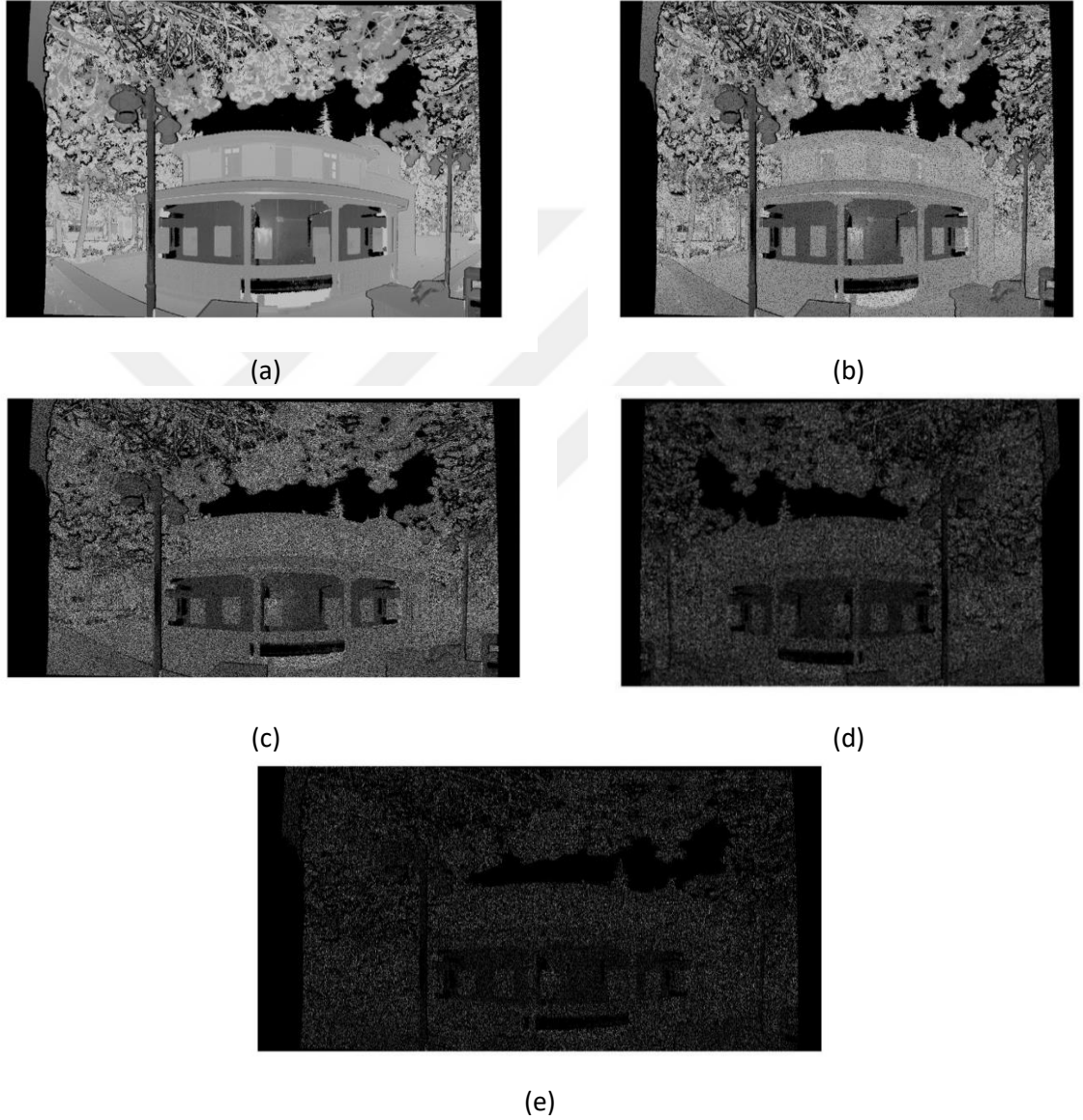
Hoca Ahmet Fakih Camii nokta bulutu verilerinin yansıma değerleri ve 3B koordinatlarıyla 600 x 900 (W x H) piksel boyutlarında 180° yatay tarama açısında yansıma görüntüleri elde edilmiştir. Farklı yoğunlukta nokta bulutlarına ait yansıma görüntüleri arasında karşılaştırma yapılabilmesi için verilen piksel boyutları sabit tutulmuştur. Piksel boyutları sabit tutulmasından dolayı nokta yoğunluğu düşük nokta bulutlarından oluşturulan yansıma görüntülerinde piksel boşlukları oluşmuştur. 0,5 nokta yoğunluğuna sahip nokta bulutundan elde edilen yansıma görüntüsünde herhangi bir piksel boşluğu oluşmamıştır (Şekil 4.1). 1 cm, 3 cm, 5 cm ve 10 cm yansıma görüntülerinde ise nokta yoğunluğu az olması sebebiyle piksel boşlukları oluşmuştur (EK-1).



Şekil 4.1. Hoca Ahmet Fakih Camii'nin 8 farklı tarama istasyonundan 0,5 cm yoğunlukta nokta bulutu (üst) ve nokta bulutuna ait yansımaya görüntüleri (alt).

Aynı istasyona ait farklı yoğunlukta tarama verileriyle oluşturulmuş yansımaya görüntüleri Şekil 4.2'de görülmektedir. Şekil 4.2 (a)'da camiinin 0,5 cm nokta sıklığına ait yansımaya görüntüsünden camii üzerindeki pencereler, bina köşeleri vb. tüm detaylar rahatlıkla seçilebilmektedir. 1 cm nokta sıklığına sahip yansımaya görüntüsünden de binaya

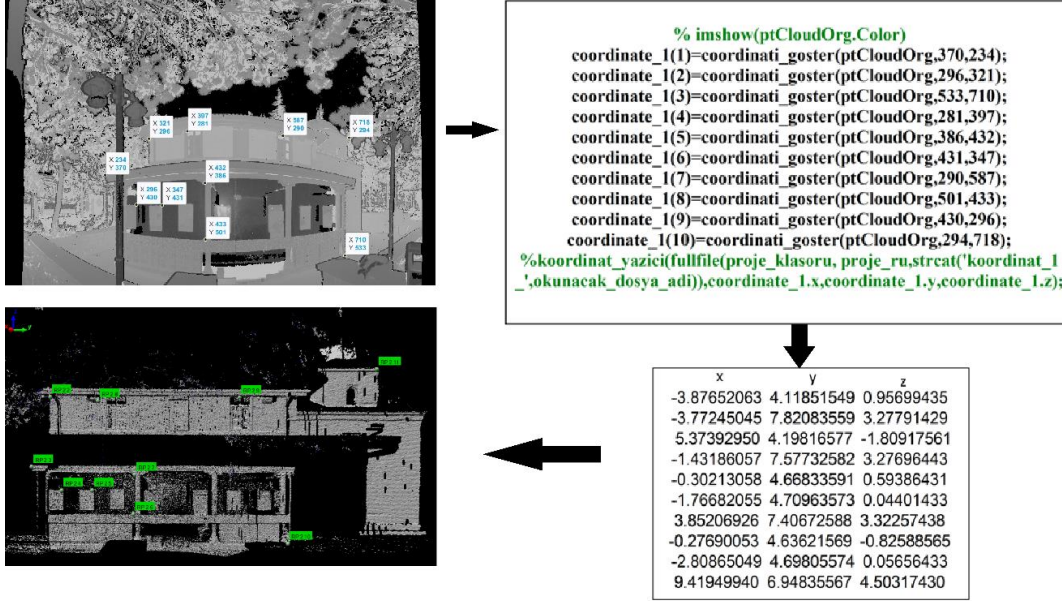
ait tüm detaylar yine rahat seçilebilmektedir. 3 cm nokta sıklığındaki yansıma görüntüsünde bazı köşe detaylarının seçimi zorlaşmıştır. 5 cm ve 10 cm nokta sıklıklarındaki yansıma görüntülerinde detay seçimi oldukça zorlaşmıştır. Manuel birleştirme için seçilecek detayları bulabilmek çok güçleşmiştir. Bu yansıma görüntülerinde pikseller arasında boşluklar oluştuğu için otomatik birleştirmede eşleşen nokta bulunması zorlaşacak ve hata miktarı da artacaktır.



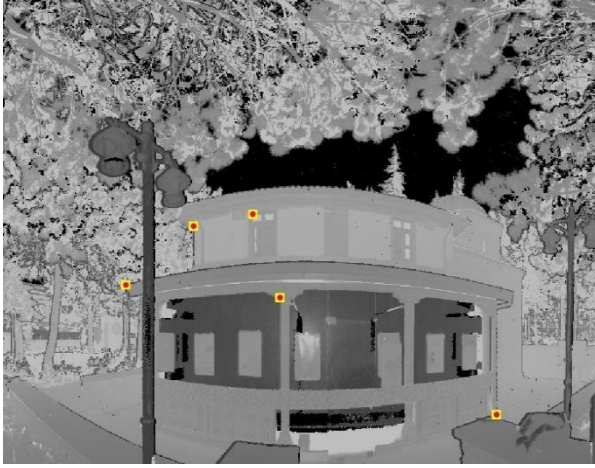
Şekil 4.2. Hoca Ahmet Fakih Camii (a) 0,5 cm, (b) 1 cm, (c) 3 cm, (d) 5 cm ve (e) 10 cm tarama yoğunluğuna sahip nokta bulutları için oluşturulmuş yansıma görüntüleri.

Hoca Ahmet Fakih Camii'nin farklı nokta yoğunluklarındaki nokta bulutlarının birleştirilmesi için yansıma görüntüleri üzerinden ayrı ayrı 5 ve 10 adet eşlenik detay noktası seçilmiştir. Bu detay noktalarının piksel koordinatları (u, v) yansıma görüntüleri

üzerinden okunmuştur. Elde edilen piksel koordinatlarının nokta bulutundaki karşılıklarını (x,y,z) bulmak için MATLAB yazılımında kod oluşturulmuştur. Seçilen tüm detay noktalarının nokta bulutundaki karşılıkları bu şekilde tespit edilmiştir (Şekil 4.3). Bu şekilde tespit edilen eşlenik detay noktalarının koordinatları yardımıyla nokta bulutları birleştirilmiştir. Bindirmeli ardışık iki yansıma görüntüsünden seçilen eşlenik detay noktaları Şekil 4.4'te görülmektedir.



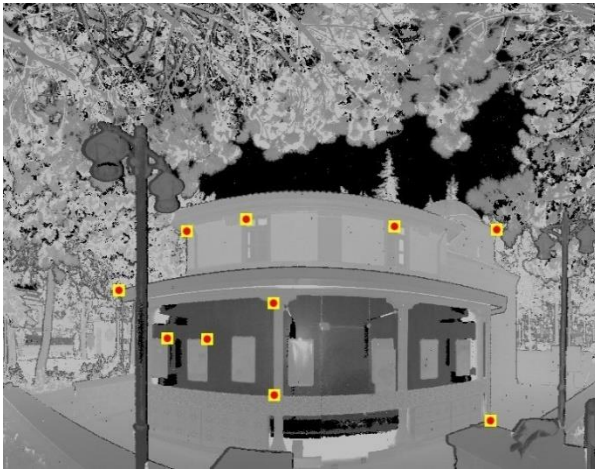
Şekil 4.3. Eşlenik detay noktaları koordinatlarının nokta bulutundaki karşılıkları



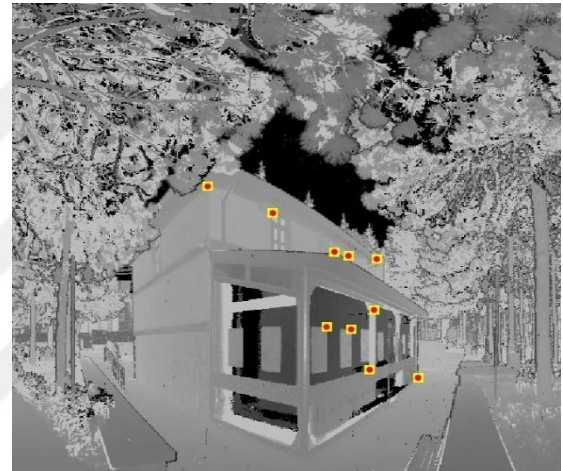
(a)



(b)



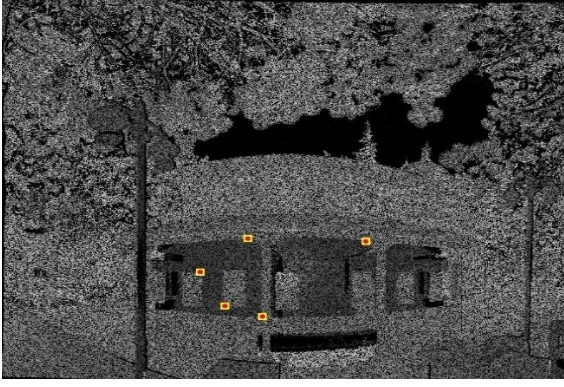
(c)



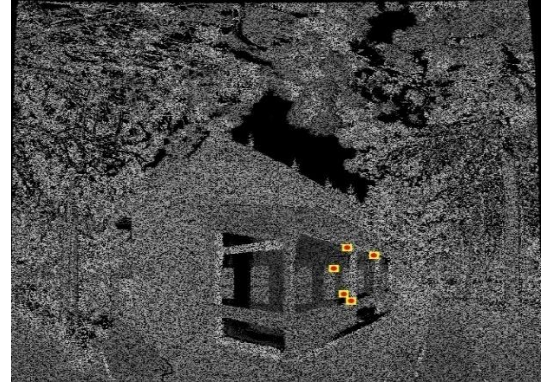
(d)

Şekil 4.4. Hoca Ahmet Fakih Camii 0,5 cm nokta sıklığına ait bindirmeli yansıma görüntüleri üzerinden seçilen (a) 5 eşlenik detay noktası ve (b) 10 eşlenik detay noktaları.

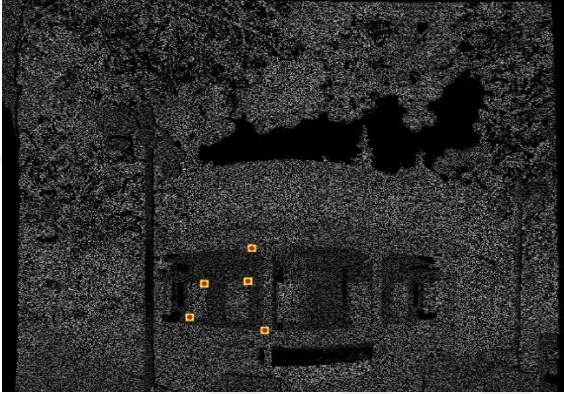
Nokta sıklıkları sırasıyla 0,5 cm, 1 cm ve 3 cm nokta bulutlarıyla elde edilen yansıma görüntülerinden 5 ve 10 adet eşlenik nokta seçimi kolaylıkla tamamlanmıştır. Buna rağmen 5 cm ve 10 cm nokta sıklıklarına ait yansıma görüntülerinde ise 5 adet eşlenik nokta seçimi yapılmış (Şekil 4.5) ancak 10 adet eşlenik detay noktası seçilememiştir.



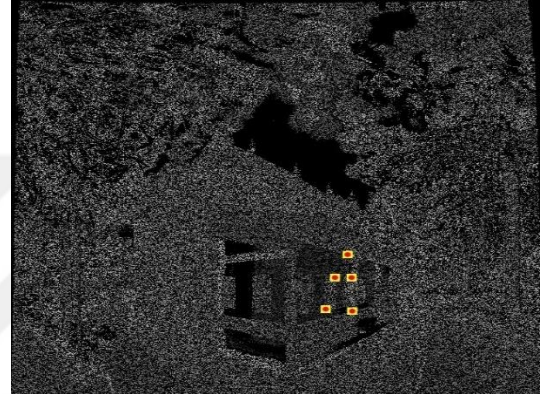
(a)



(b)



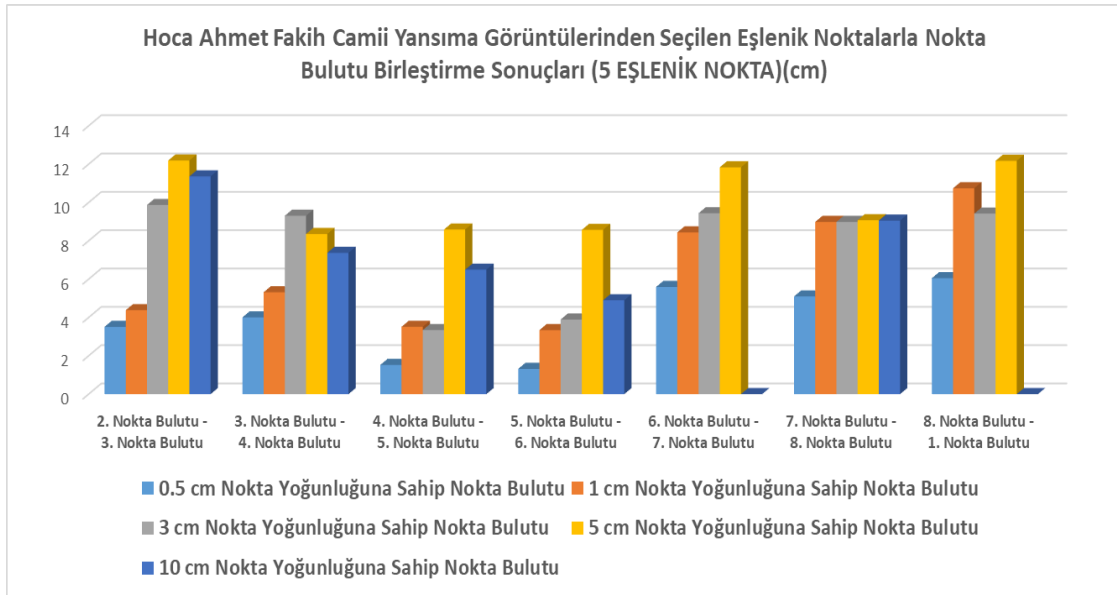
(c)



(d)

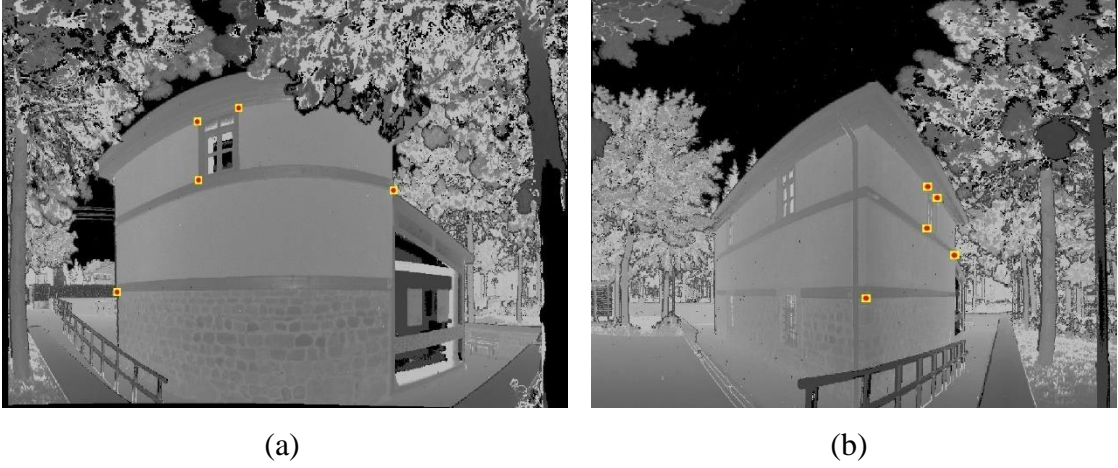
Şekil 4.5. Hoca Ahmet Fakih Camii 5 cm (üstte a,b) ve 10 cm (altta c,d) nokta sıklığına ait ardışık (2. ve 3. istasyonlar) yansımaya görüntüleri üzerinden seçilen 5 adet eşlenik detay noktası

Yansımaya görüntülerinden yukarıda belirtildiği şekilde seçilen eşlenik detay noktalarıyla bindirmeli nokta bulutları birleştirilmiştir. Farklı yoğunlukta yansımaya görüntülerinden seçilen 5 eşlenik nokta ile ikili birleştirme sonuçları Şekil 4.6'da verilmiştir.



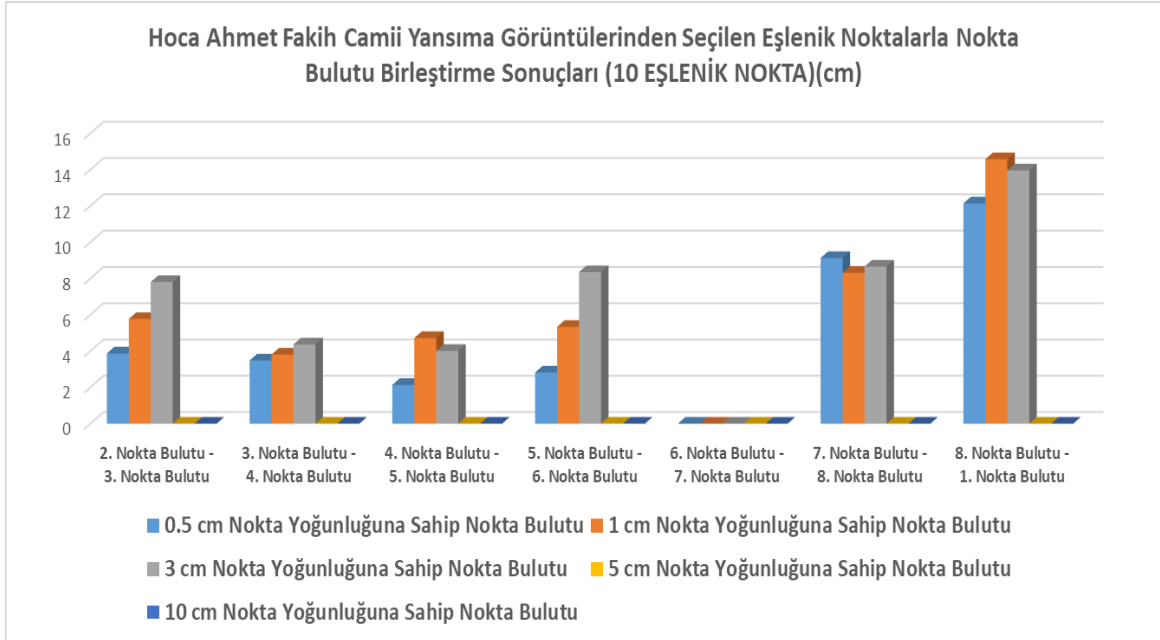
Şekil 4.6. Hoca Ahmet Fakih Camii yansıma görüntüsünden 5 adet eşlenik detay noktası seçimiyle nokta bulutlarını birleştirme sonuçları

Şekil 4.6'da verilen grafikte görüldüğü üzere nokta yoğunluğu yüksek olan yansıma görüntüleri ile birleştirmede daha iyi sonuçlar elde edilmiştir. Bunun sebebi 5 ve 10 cm nokta sıklıklarındaki yansıma görüntüsünün pikselleri arasında oluşan boşluklar sebebiyle eşlenik detay noktalarının seçiminin zorlaşmasıdır. Ancak 5 cm veya 10 cm nokta yoğunluğundaki yansıma görüntüsünde eğer detaylar iyi seçilebiliyorsa yüksek doğruluk sağlanabilmektedir. 4. ve 5. nokta bulutlarının birleştirme doğruluğu diğer ikili birleştirmelerden daha yüksektir. Burada da aynı şekilde seçilen detay noktalarının niteliği daha iyidir. Çünkü buradaki detaylar keskin yapıda olması sebebiyle iki görselde de tam karşılık gelen pikseller seçilebilmiştir ve eşlenik nokta dağılımı iyidir (Şekil 4.7). Birleştirme sonucu oluşan hata miktarı da buna bağlı olarak düşmüştür. 6. ve 7. nokta bulutları ve 8. ve 9. nokta bulutları arasında ise 10 cm nokta sıklığına sahip yansıma görüntülerinden 5 adet eşlenik detay noktası seçilememiş dolayısıyla bu nokta bulutları birleştirilememiştir.



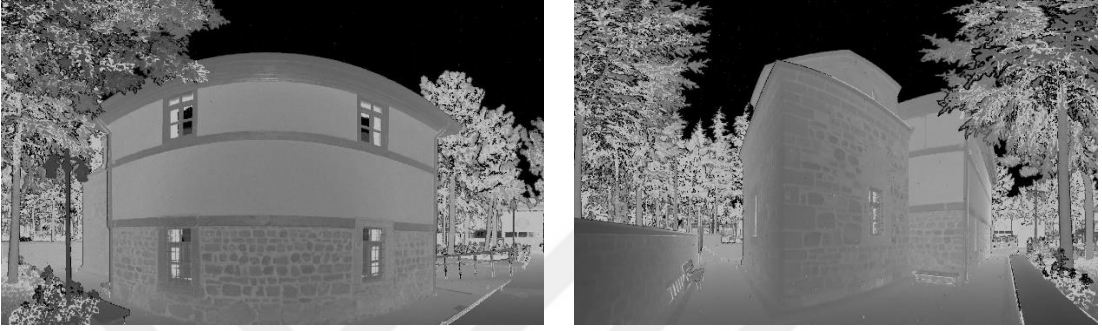
Şekil 4.7. Hoca Ahmet Fakih Camii 5 cm nokta yoğunluğuna ait 4. ve 5. istasyon yansıma görüntüleri üzerinden seçilen 5 adet eşlenik detay noktaları

Hoca Ahmet Fakih Camii'nin 10 adet eşlenik detay noktası seçimi ile nokta bulutlarının manuel ikili birleştirme sonuçları grafiği Şekil 4.8'de verilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde nokta bulutlarının manuel ikili birleştirmelerinin tümünde 5 cm ve 10 cm nokta sıklığına sahip yansıma görüntülerinden 10 adet eşlenik detay noktası seçilememiştir. 6. ve 7. nokta bulutu yansıma görüntüleri arasında keskin bir geçiş ve yeterli detay noktası olmadığından 0,5 cm, 1 cm, 3 cm, 5 cm ve 10 cm nokta sıklığına sahip yansıma görüntülerinden 10 adet eşlenik detay noktası seçilememiştir (Şekil 4.9).



Şekil 4.8. Hoca Ahmet Fakih Camii yansıma görüntülerinden 10 adet eşlenik detay noktası seçimiyle nokta bulutlarının birleştirilmesi sonuç doğruluğu

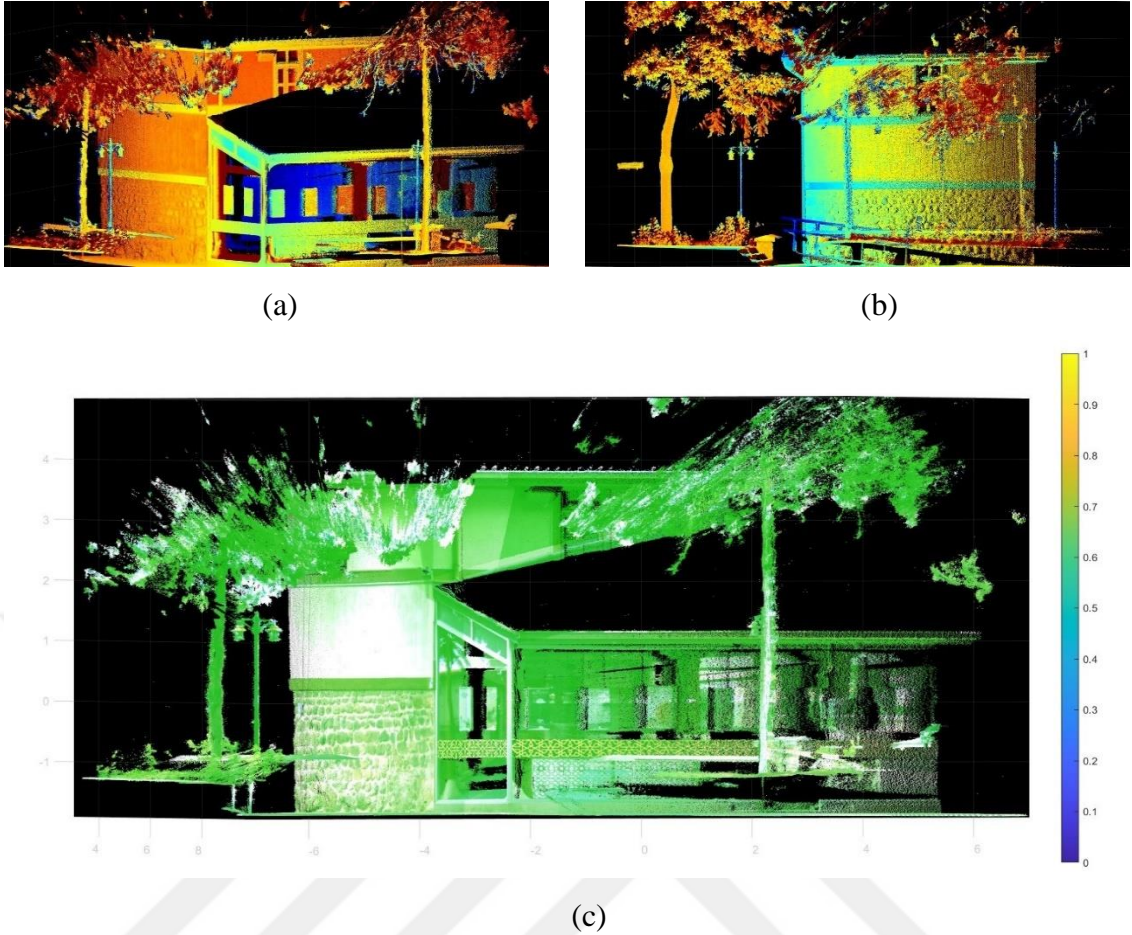
Yansıma görüntülerinden seçilen 5 ve 10 adet eşlenik nokta ile yapılan ikili birleştirmeler karşılaştırıldığında sonuçların birbirine yakın olduğu görülmektedir (Şekil 4.6, Şekil 4.8). Sonuç doğruluğunda noktaların dağılımının etkili olduğu anlaşılmaktadır. Nokta sayısının artırılması ancak uygun dağılımda olmaması sonuç doğruluğunu düşürmektedir. Uygun dağılımda en az 5 eşlenik nokta dönüşümün istenilen doğrulukla yapılabilmesi için yeterlidir.



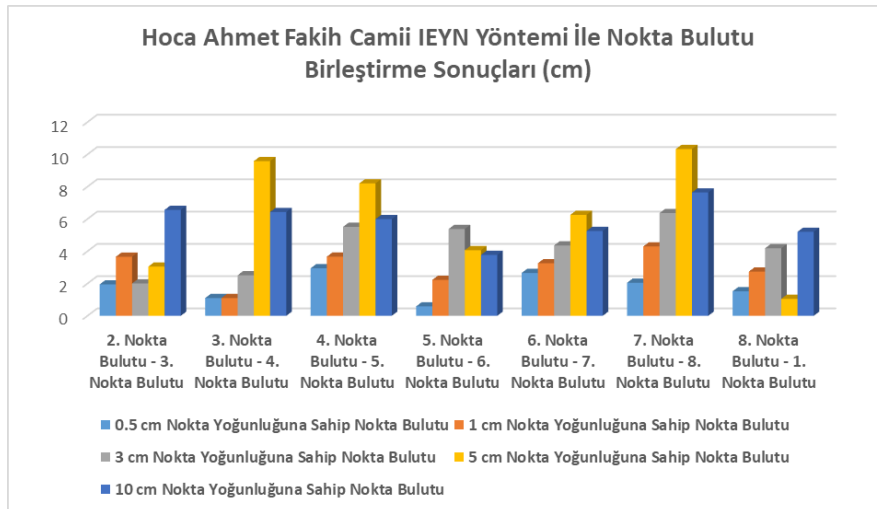
Şekil 4.9. Hoca Ahmet Fakih Camii 6. ve 7. nokta bulutu yansıma görüntüleri arasında keskin geçişten dolayı yeterli eşlenik detay noktası bulunmamaktadır.

4.1.2. İteratif En Yakın Nokta Yöntemiyle Nokta Bulutlarının Birleştirilmesi

Hoca Ahmet Fakih Camii nokta bulutları iteratif en yakın nokta yöntemine göre de birleştirilmiştir. İteratif en yakın nokta yöntemin de kullanılan parametreler dönme matrisi için 0,001 cm, öteleme matrisi için 0,05 cm eşik değeri belirlenmiştir. Maksimum iterasyon sayısı 150 girilmiştir. Nokta bulutlarının yaklaşık yöneltmesi etkileşimli olarak yapıldıktan sonra iteratif en yakın nokta yöntemi uygulanmıştır. Nokta bulutlarının ikili birleştirmesinde birçok nokta bulutu arasında maksimum iterasyon sayısına varmadan dönme ve öteleme matrisleri için belirlenen hassasiyete ulaşıldığında iterasyon tamamlanmıştır (Şekil 4.10). İEYN yöntemi ile yapılan bir ikili birleştirme sonuçları Şekil 4.11’de verilmiştir.

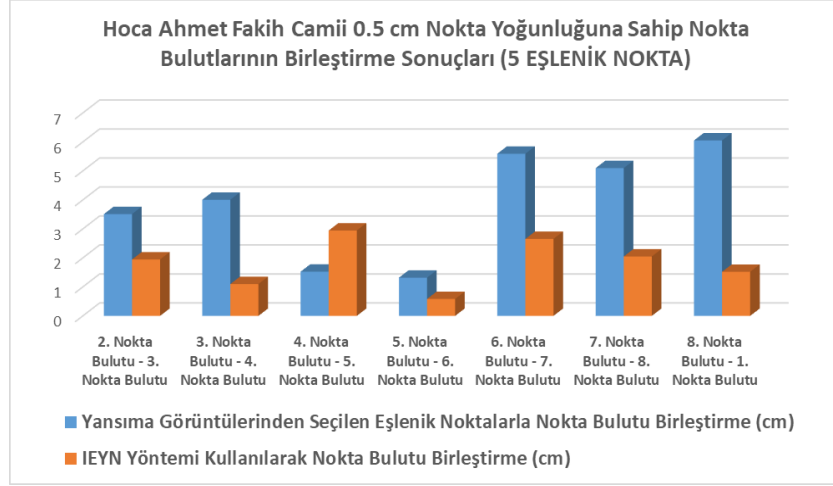


Şekil 4.10. Hoca Ahmet Fakih Camii (a) 3. nokta bulutu, (b) 4. nokta bulutu ve (c) iteratif en yakın nokta yöntemi birleştirme sonucu

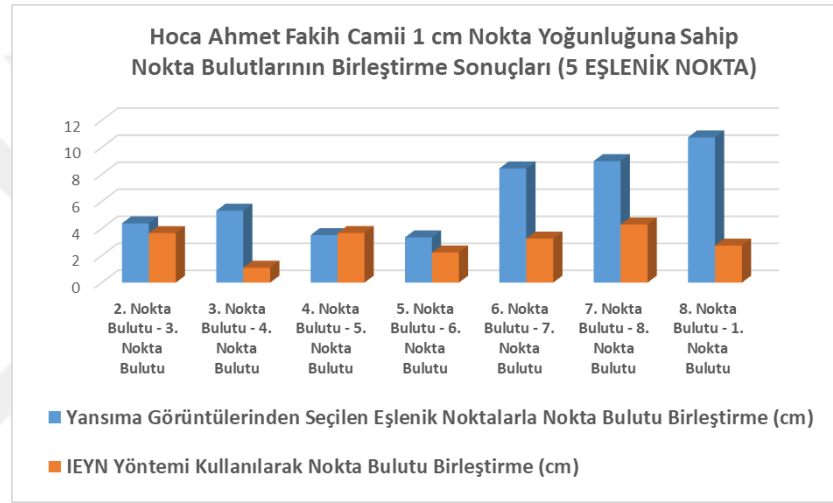


Şekil 4.11. Hoca Ahmet Fakih Camii iteratif en yakın nokta yöntemi ile nokta bulutlarının birleştirme sonuçları

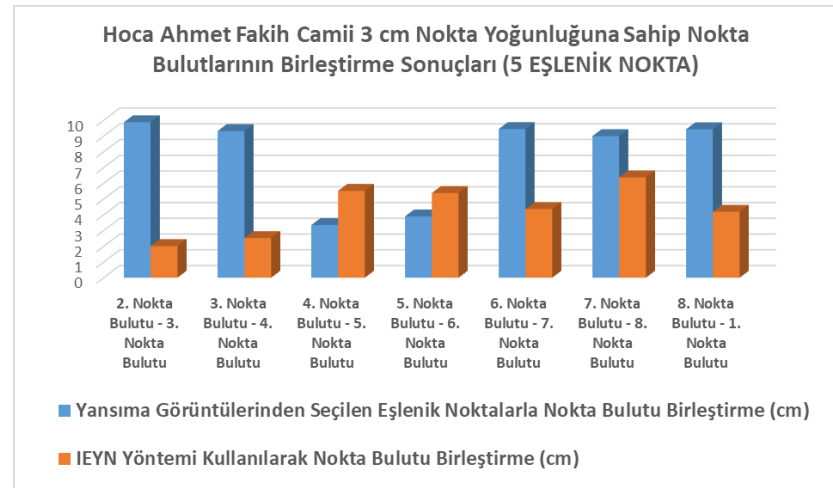
Elde edilen sonuçlar İEYN yöntemiyle birleştirmelerin yüksek doğrulukla yapıldığını göstermektedir. İEYN ve yansıma görüntüsünden 5 eşlenik nokta ile yapılan birleştirme sonuçlarının karşılaştırması Şekil 4.12’de görülmektedir.



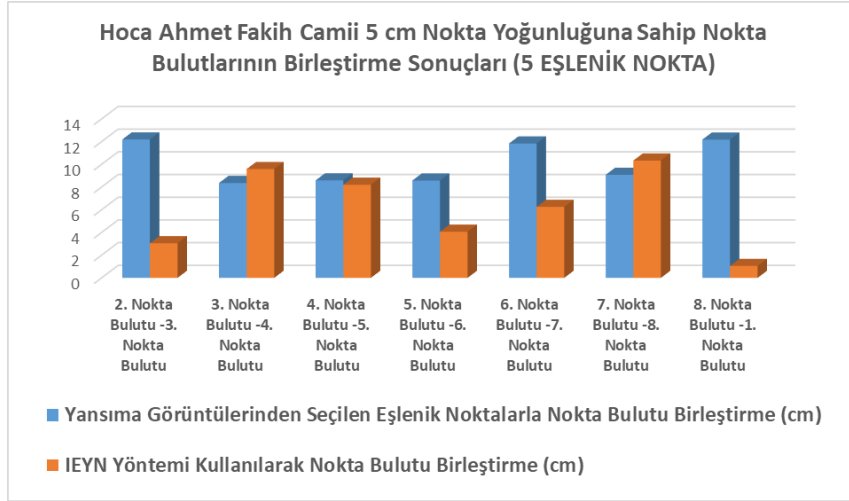
(a)



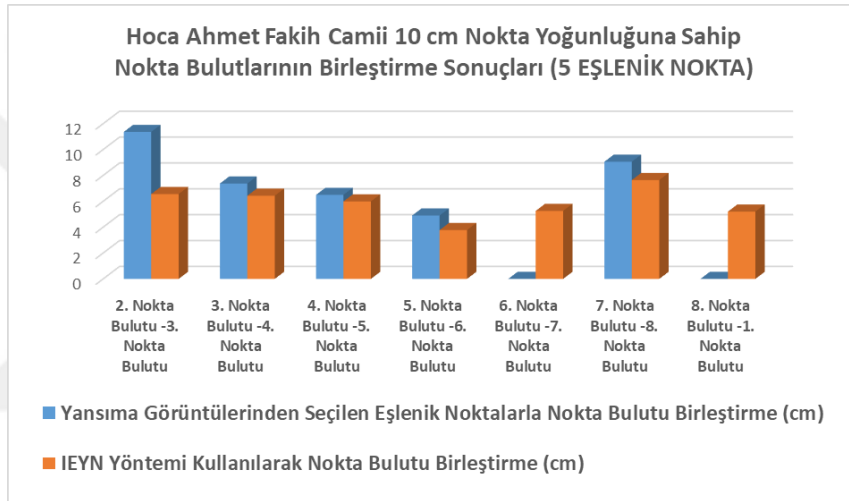
(b)



(c)



(d)

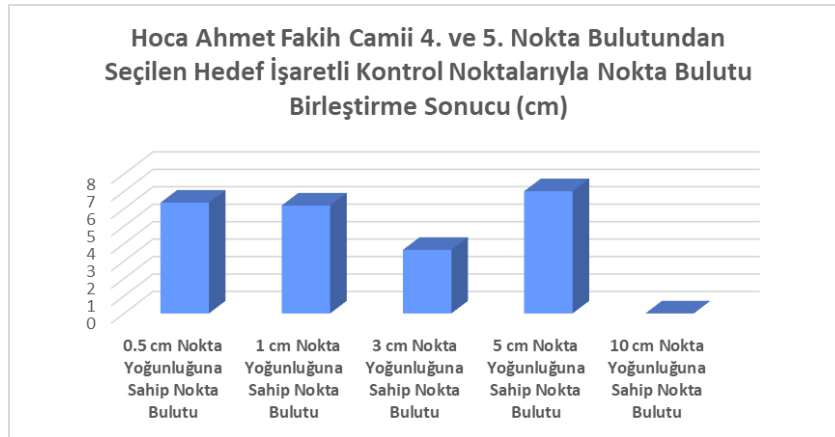


(e)

Şekil 4.12. Hoca Ahmet Fakih Camii nokta bulutlarının manuel (5 eşlenik detay noktası) ve İEYN yöntemi birleştirme sonuçlarının karşılaştırması. (a) 0,5 cm, (b) 1 cm, (c) 3 cm, (d) 5 cm ve (e) 10 cm'lik nokta yoğunluğuna ait birleştirme sonuçları.

4.1.3. Nokta Bulutundan Seçilen Hedef İşaretli Kontrol Noktaları ile Nokta Bulutlarının Birleştirilmesi

İki nokta bulutunun ortak tarama alanına yerleştirilen hedef işaretlerinin nokta bulutundan seçilmesi ile iki nokta bulutu birleştirilmiştir. Birleştirmeler bu nokta bulutlarının farklı yoğunlukları için yapılmıştır. Birleştirme sonucunda elde edilen dönüşüm hataları Şekil 4.13'te verilmiştir.

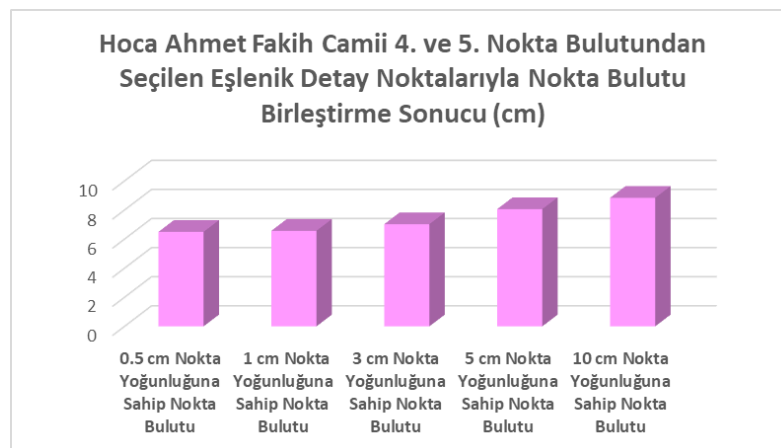


Şekil 4.13. Nokta bulutundan seçilen hedef işaretli kontrol noktalarıyla nokta bulutu birleştirme sonuçları

Elde edilen birleştirme doğruluğu ortalama 6 cm civarındadır. 5 cm nokta yoğunluğunda doğruluk bir miktar daha düşük çıkmıştır. 10 cm yoğunluğuna sahip taramada hedef işaretleri seçilemediği için birleştirme yapılamamıştır.

4.1.4. Nokta Bulutundan Seçilen Eşlenik Detay Noktaları ile Nokta Bulutlarının Birleştirilmesi

İki nokta bulutunun ortak tarama alanında kapı, pencere köşesi gibi belirgin detaylardan eşlenik noktalar oluşturulmuştur. Farklı yoğunlukta nokta bulutları seçilen 5 eşlenik nokta ile birleştirilmiştir. Birleştirme sonucunda elde edilen dönüşüm hataları Şekil 4.14'te verilmiştir.



Şekil 4.14. Nokta bulutundan seçilen eşlenik detay noktalarıyla nokta bulutu birleştirme sonuçları

Elde edilen birleştirme doğruluğu ortalama 6 cm civarındadır. 5 cm ve 10 cm nokta yoğunluğunda doğruluk bir miktar daha düşüktür.

4.1.5. Model Doğruluğu Araştırması

Hoca Ahmet Fakih Camii'nin nokta bulutlarının birleştirilmesi ile elde edilen 3B nokta bulutu model doğruluğu hesaplanmıştır. Bunun için bina üzerinde tesis edilen 11 adet hedef işaretli kontrol noktaları kullanılmıştır. Kontrol noktalarının dönüşümden sonraki koordinatları ile hesaplanan Öklid mesafeleri (Çizelge 4.1) karşılaştırılarak Denklem 3.14'te verilen doğruluk kriteri hesaplanmıştır. 3B model doğruluğu kriteri arazi çalışmasında total station ile okunan kontrol noktaları koordinatları ile elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır (Çizelge 4.2).

Çizelge 4.1. Model doğruluğu araştırması için kontrol noktaları arasında hesaplanan Öklid mesafeleri.

Total station ile ölçülen koordinatlarla hesaplanan mesafe d_{ij}	Yansıma görüntüsü ile birleştirilen model koordinatları ile hesaplanan mesafe d_{ij}	Nokta bulutu kontrol noktaları ile birleştirilen model koordinatları ile hesaplanan mesafe d_{ij}
7.685	7.635	7.651
7.773	7.767	7.778
10.195	10.111	10.175
12.435	12.361	12.368
15.305	15.399	15.143
15.020	15.169	15.132
14.892	14.872	14.982
7.685	7.670	7.651
0.385	0.376	0.367
6.795	6.730	6.821
9.888	9.900	10.705
15.353	15.322	15.283
15.922	15.962	15.968
16.692	16.621	16.685
7.773	7.757	7.779
0.385	0.408	0.363
6.419	6.567	6.737
9.513	10.805	10.804

15.010	14.965	14.940
15.599	15.513	15.490
16.393	16.373	16.361
10.195	10.111	10.175
6.795	6.894	6.863
6.419	6.807	6.818
3.117	3.222	3.175
8.923	8.962	8.930
9.825	9.799	9.822
11.011	10.993	10.838
12.435	12.361	12.368
9.889	9.935	9.909
9.514	9.775	9.839
3.118	3.222	3.261
6.249	6.261	6.545
7.486	7.483	7.463
8.933	8.869	8.790
15.305	15.399	15.359
15.354	15.387	15.335
15.010	15.096	15.042
8.923	8.907	8.971
6.249	6.275	6.314
1.816	1.833	1.856
3.604	3.526	3.505
15.020	15.138	15.132
15.923	15.921	15.978
15.600	15.536	15.517
9.825	9.817	9.888
7.486	7.475	7.412
1.816	1.817	1.902
2.018	2.190	2.238
14.893	14.872	14.802
16.692	16.660	16.653

16.394	16.306	16.279
11.011	11.117	11.107
8.933	8.894	8.885
3.604	3.546	3.520
2.018	2.033	2.046

Çizelge 4.2. Hoca Ahmet Fakih Camii için hesaplanan model doğruluğunun kriteri

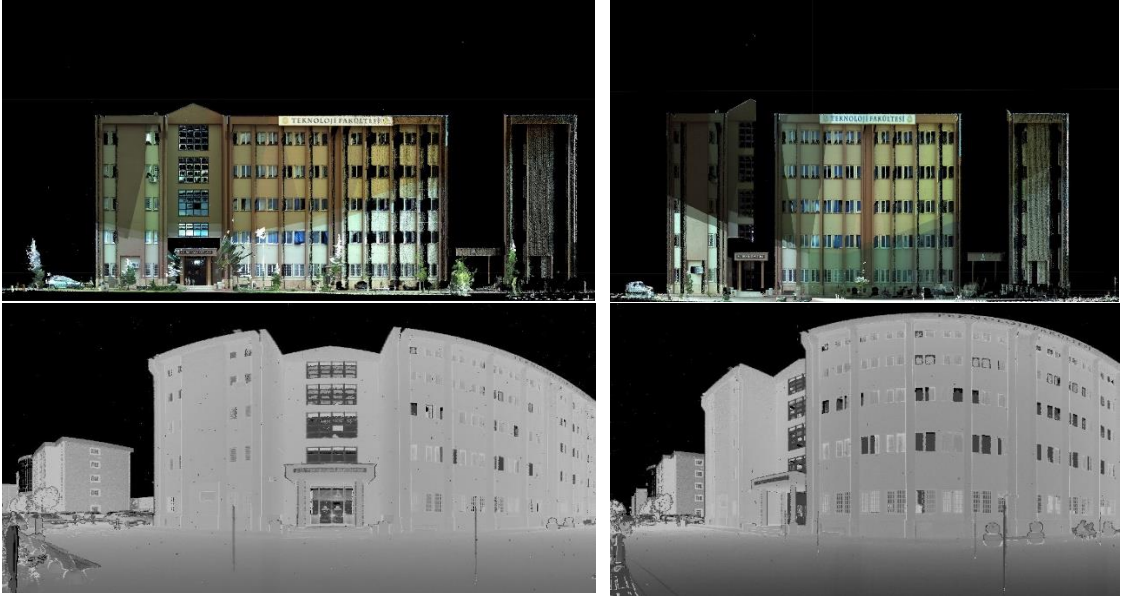
Total station koordinatlarına göre model doğruluğu d_m	Yansıma görüntüsü ile oluşturulan nokta bulutu modeli d_m	Nokta Bulutu Kontrol Noktaları ile oluşturulan nokta bulutu modeli d_m
3.129	3.135	3.138

Çizelge 4.2. incelendiğinde yansıma görüntülerinden yapılan birleştirme ve nokta bulutundan seçilen hedef işaretli kontrol noktaları ile yapılan birleştirme doğruluklarının birbirine yakın olduğu görülmektedir. Her iki sonucun total station koordinatları ile elde edilen sonuçla karşılaştırılması da model doğruluğunun yüksek olduğunu göstermektedir.

4.2. Selçuk Üniversitesi Teknoloji Fakültesi

4.2.1. Yansıma Görüntülerinden Seçilen Eşlenik Noktalarla Nokta Bulutu Birleştirilmesi

Teknoloji fakültesinin 5 farklı nokta yoğunluklarında nokta bulutu verilerinden 600 x 900 (W x H) piksel boyutlarında 180° yatay tarama açısında yansıma görüntüleri oluşturulmuştur. Yansıma görüntüleri iki tarama istasyonundan yapılan 0,5 cm (Şekil 4.15), 1 cm, 3 cm, 5 cm ve 10 cm nokta yoğunluklarının her biri için ayrı ayrı oluşturulmuştur (EK-2).

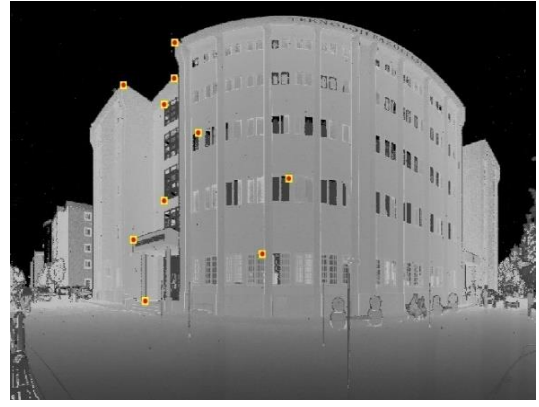


Şekil 4.15. Teknoloji fakültesinin 1. ve 2. tarama istasyonundan 0,5 cm nokta sıklığına sahip nokta bulutu ve bu nokta bulutundan elde edilen yansıma görüntüsünün gösterimi.

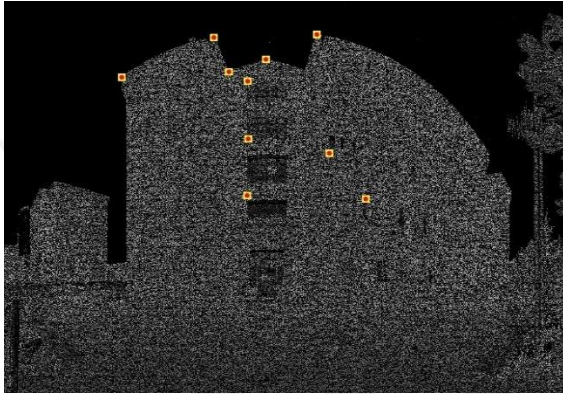
Teknoloji fakültesi nokta bulutu, Hoca Ahmet Fakih Camii'ne göre daha geniş bir tarama alanına sahip olduğu için 600 x 900 (W x H) piksel boyutlarında 180° yatay tarama açısında elde edilen yansıma görüntülerinden detay seçimi daha kolay olmuştur. Özellikle 5 cm nokta yoğunluğuna sahip nokta bulutundan oluşturulan yansıma görüntüleri karşılaştırıldığında teknoloji fakültesi yansıma görüntüsünün pikseller arasında oluşan boşlukların daha az olduğu görülmektedir. Bu durum teknoloji fakültesinin 5 cm nokta yoğunluğunda Hoca Ahmet Fakih Camii'ne göre detay seçiminin daha kolay olmasını sağlamıştır. Ancak 10 cm aralıklı nokta yoğunluğuna sahip nokta bulutu verisinden elde edilen yansıma görüntünde pikseller arası oluşan boşluklar artmıştır ve detayların seçilmesi oldukça güçleşmiştir. Şekil 4.16'da 0,5 cm ve 10 cm yoğunluklu yansıma görüntüleri üzerinden seçilen eşlenik detay noktaları görülmektedir.



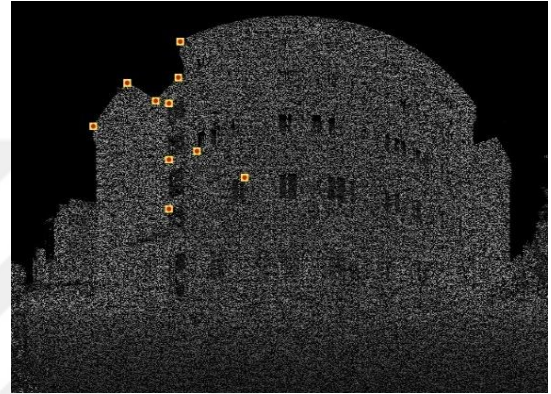
(a)



(b)



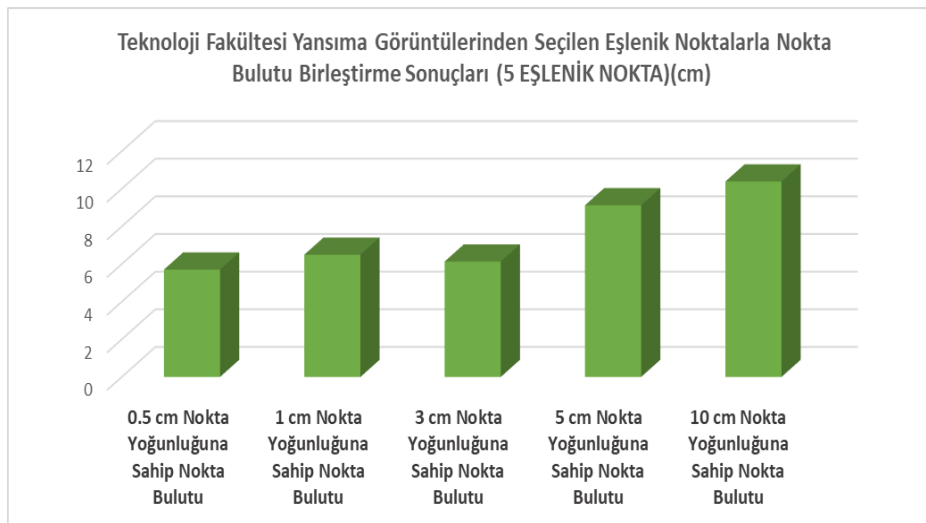
(c)



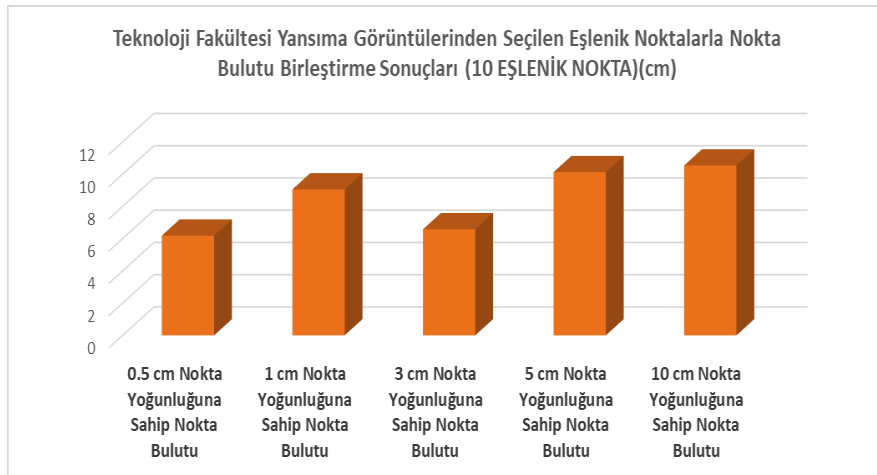
(d)

Şekil 4.16. Teknoloji Fakültesinin bindirmeli taramalarına ait yansımaya görüntüleri üzerinden seçilen eşlenik detay noktaları. (a) 0,5 cm nokta yoğunluğu ve 10 eşlenik nokta (b) 10 cm nokta yoğunluğu ve 10 eşlenik nokta.

Yansımaya görüntülerinden seçilen eşlenik detay noktalarının nokta bulutu koordinatları elde edilerek birleştirme gerçekleştirilmiştir. Birleştirmede 1. nokta bulutu referans alınmış diğeri bu sisteme dönüştürülmüştür (Şekil 4.17, Şekil 4.18).



Şekil 4.17. Selçuk Üniversitesi Teknoloji Fakültesi bindirmeli nokta bulutlarının yansımaya görüntüsünden seçilen 5 eşlenik nokta ile birleştirme sonuçları

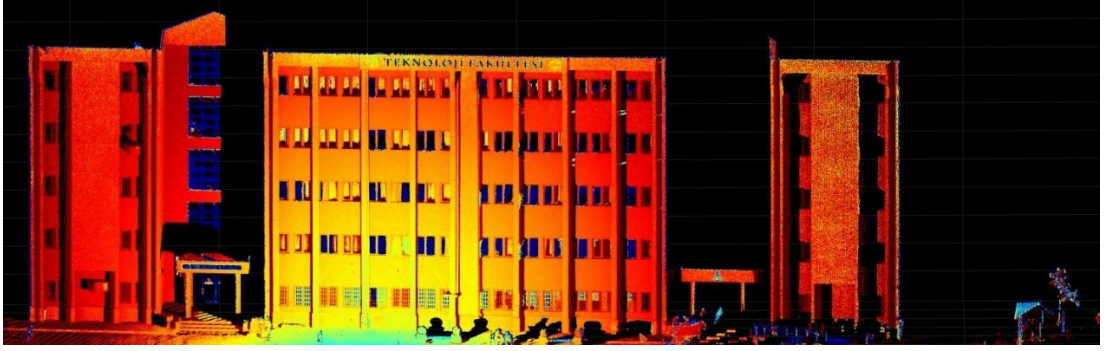


Şekil 4.18. Selçuk Üniversitesi Teknoloji Fakültesi bindirmeli nokta bulutlarının yansımaya görüntüsünden seçilen 10 eşlenik nokta ile birleştirme sonuçları

Teknoloji Fakültesi nokta bulutlarının yansımaya görüntüleri kullanılarak birleştirmelerinde 5 adet ve 10 adet eşlenik nokta seçimi sonuç doğruluklarının birbirine yakın olduğu görülmüştür (Şekil 4.17, Şekil 4.18). Teknoloji Fakültesi yansımaya görüntüleri üzerinden eşlenik detay nokta seçimi birçok pencere vb. detay barındığından Hoca Ahmet Fakih Camii'ne göre daha kolay olmuştur.

4.2.2. İteratif En Yakın Nokta Yöntemiyle Nokta Bulutlarının Birleştirilmesi

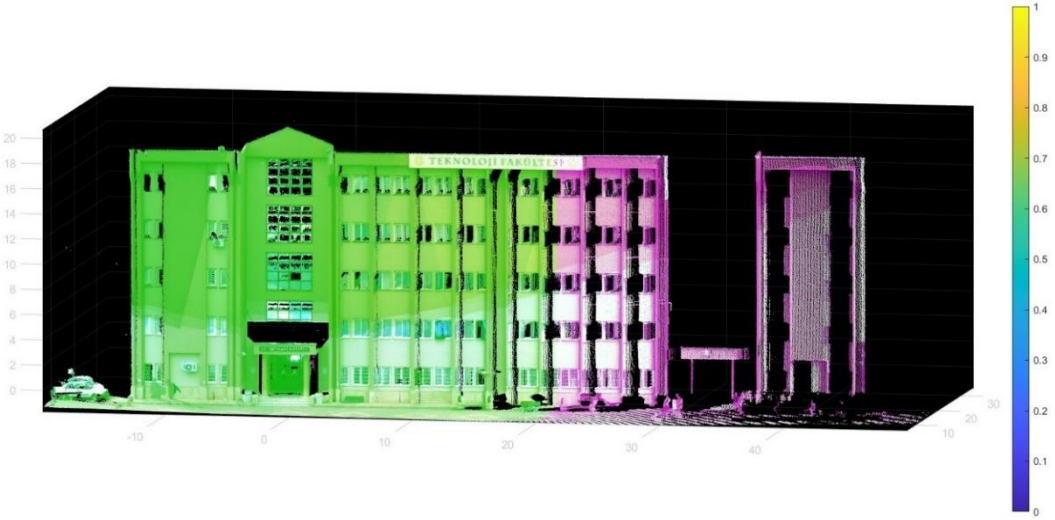
İki nokta bulutundan birisi referans seçilerek diğerinin bu koordinat sistemine yaklaşık dönüşümü etkileşimli olarak yapılmıştır. Yaklaşık dönüşüme İEYN yöntemi ile hassas birleştirme uygulanmıştır (Şekil 4.19). Teknoloji Fakültesinin 0,5 cm, 1 cm, 3 cm, 5 cm, 10 cm nokta yoğunluğuna sahip nokta bulutları için bu birleştirme yöntemi ayrı ayrı uygulanmıştır (Şekil 4.20).



(a)

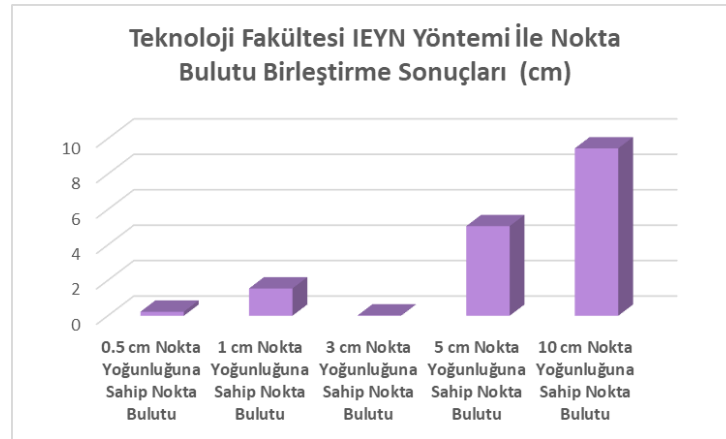


(b)



(c)

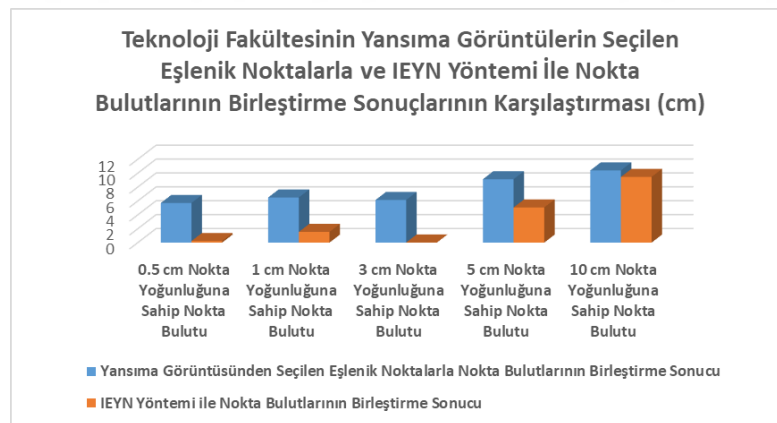
Şekil 4.19. Selçuk Üniversitesi Teknoloji Fakültesi nokta bulutlarının İEYN yöntemiyle birleştirilmesi 0, 5 cm nokta yoğunluğuna sahip (a) 1. ve (b) 2. nokta bulutu, (c) 1. ve 2. Nokta bulutlarının İEYN yöntemine göre birleştirme sonucu.



Şekil 4.20. Teknoloji Fakültesinin iteratif en yakın nokta yöntemi ile nokta bulutlarının birleştirme sonuçları

İteratif en yakın nokta yöntemi birleştirme doğruluğu tarama nokta yoğunluğundan çok fazla etkilenmez (Altuntas, 2014). Elde edilen birleştirme doğruluğu oldukça yüksektir. Ancak çok seyrek yoğunlukta tarama yüzeyindeki benzer geometrik detaylara da bağlı olarak bir miktar doğruluk azalması görülmüştür. Elde edilen birleştirme doğruluğu tarama nokta yoğunluğunun altında kalmıştır.

Teknoloji Fakültesi İEYN yöntemi nokta bulutu birleştirme sonuçları ve yansıma görüntülerinden seçilen 5 eşlenik detay noktasıyla manuel birleştirme sonuçlarının karşılaştırma grafiği Şekil 4.21’de verilmiştir.

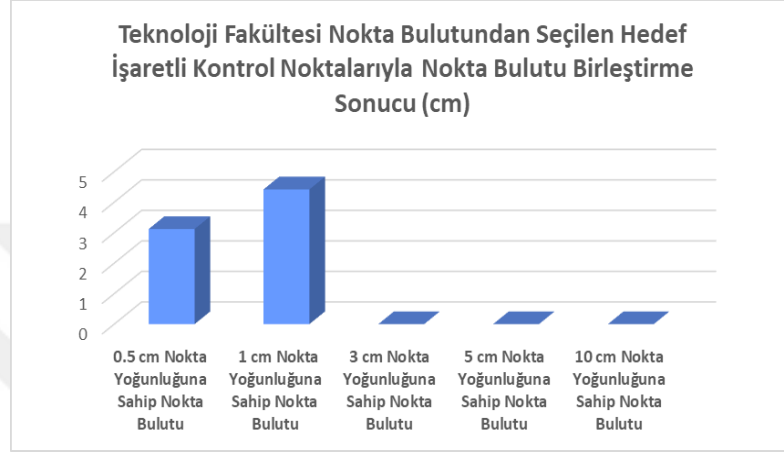


Şekil 4.21. Teknoloji Fakültesi nokta bulutlarının yansıma görüntüsünden seçilen eşlenik noktalarla ve İEYN yöntemi ile birleştirme sonuçlarının karşılaştırması (5 adet eşlenik nokta seçimi)

Teknoloji Fakültesi nokta bulutu birleştirme sonuçları incelendiğinde İteratif en yakın nokta yönteminin yansıma görüntülerinin kullanıldığı yonteme göre daha yüksek doğruluk sağladığı görülmüştür. Ancak İEYN yönteminde de 5 ve 10 cm nokta yoğunluğuna sahip veri setlerinde nokta bulutlarını birleştirme doğruluğu düştüğü görülmüştür.

4.4.3. Nokta Bulutundan Seçilen Hedef İşaretli Kontrol Noktaları ile Nokta Bulutlarının Birleştirilmesi

İki nokta bulutunun ortak tarama alanına yerleştirilen hedef işaretlerinin nokta bulutundan seçilmesi ile iki nokta bulutu birleştirilmiştir. Birleştirmeler bu nokta bulutlarının farklı yoğunlukları için yapılmıştır. Birleştirme sonucunda elde edilen dönüşüm hataları Şekil 4.22’de verilmiştir.

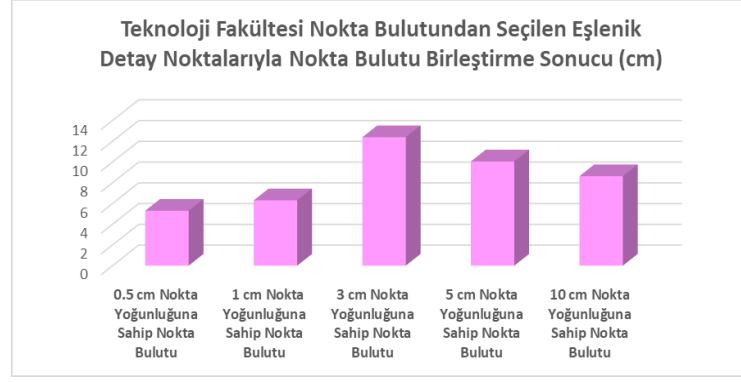


Şekil 4.22. Nokta bulutundan seçilen hedef işaretli kontrol noktalarıyla nokta bulutu birleştirme sonuçları

Elde edilen birleştirme doğruluğu ortalama 0,5 cm yoğunluk için 2,5 cm, 1 cm yoğunluk için 4 cm civarındadır. 3 cm, 5 cm ve 10 cm yoğunluğuna sahip taramalardan hedef işaretleri seçilemediği için birleştirme yapılamamıştır.

4.4.4. Nokta Bulutundan Seçilen Eşlenik Detay Noktaları ile Nokta Bulutlarının Birleştirilmesi

İki nokta bulutunun ortak tarama alanında kapı, pencere köşesi gibi belirgin detaylardan eşlenik noktalar oluşturulmuştur. Farklı yoğunlukta nokta bulutları seçilen 5 eşlenik nokta ile birleştirilmiştir. Birleştirme sonucunda elde edilen dönüşüm hataları Şekil 4.23’te verilmiştir.



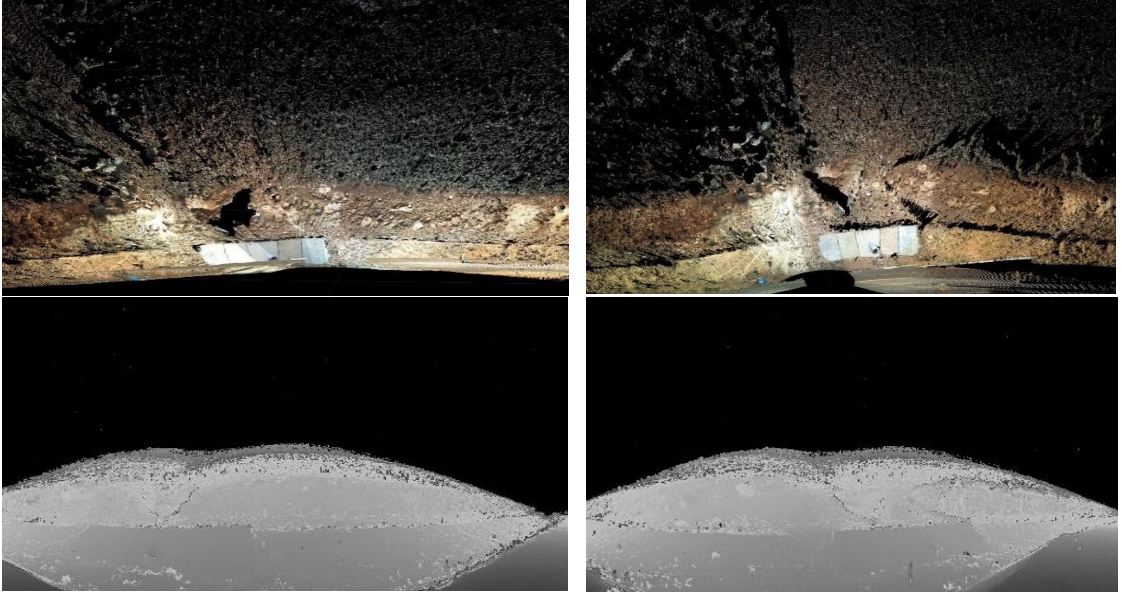
Şekil 4.23. Nokta bulutundan seçilen eşlenik detay noktalarıyla nokta bulutu birleştirme sonuçları

Yoğun nokta bulutlarının birleştirilmesinde daha yüksek doğruluk elde edilmiştir. Birleştirme doğruluğu yoğunluk arttıkça doğruluk azalmıştır. Bu doğruluk azalması çok düzenli olmayıp muhtemelen eşlenik nokta seçimi doğruluğundan da etkilenmiştir. Çünkü aynı detay seçimi doğruluğu nokta yoğunluğuna bağlıdır.

4.3. Yol Şevi

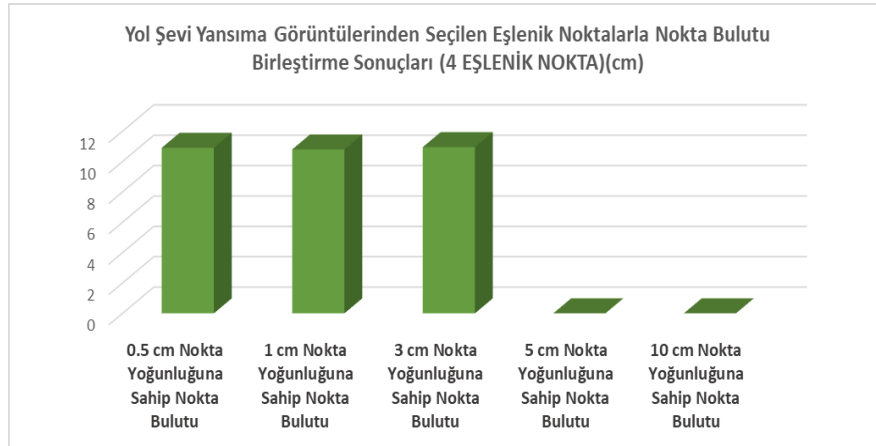
4.3.1. Yansıma Görüntülerinden Seçilen Eşlenik Noktalarla Nokta Bulutlarının Birleştirilmesi

Tüm nokta yoğunluklarındaki nokta bulutu verilerinden 600 x 900 (W x H) piksel boyutlarında 180° yatay tarama açısında yansıma görüntüleri elde edilmiştir. Yol şevi yüzeyde bulunan taş ve kaya parçalarının yansıma özellikleri birbirine yakın olduğu için detayların seçilmesi zordur. Böylesine zor bir yüzeyde yansıma görüntüsü başarılı bir şekilde oluşturulmuştur ancak yansıma görüntüsünün farklı yansıma özelliklerinden dolayı gri renk tonlaması detayların seçimini daha da zorlaştırmıştır. 0,5 cm nokta yoğunluğuna sahip 3B nokta bulutu verisinde dahi detay seçimi zor olmuştur (Şekil 4.24). Özellikle 5 cm ve 10 cm nokta yoğunluğuna sahip nokta bulutundan oluşturulan yansıma görüntülerinden detay seçimi oldukça zorlaşmıştır (EK-3). 5 cm ve 10 cm nokta yoğunlukları için yeterli eşlenik nokta seçilemediğinden birleştirme yapılamamıştır.



Şekil 4.24. Yol şevinin 1. ve 2. tarama istasyonundan 0,5 cm nokta sıklığına sahip nokta bulutu ve bu nokta bulutundan elde edilen yansımaya görüntüsünün gösterimi.

Yol şevine ait iki taramadan birisi referans seçilerek diğer nokta bulutunun referans sisteme dönüşümü yapılarak birleştirilmiştir. Dönüşüm parametreleri 4 eşlenik nokta seçilerek hesaplanmıştır. Yansımaya görüntülerinden seçilen eşlenik noktalarla nokta bulutlarının birleştirme sonuçları Şekil 4.25'te verilmiştir.

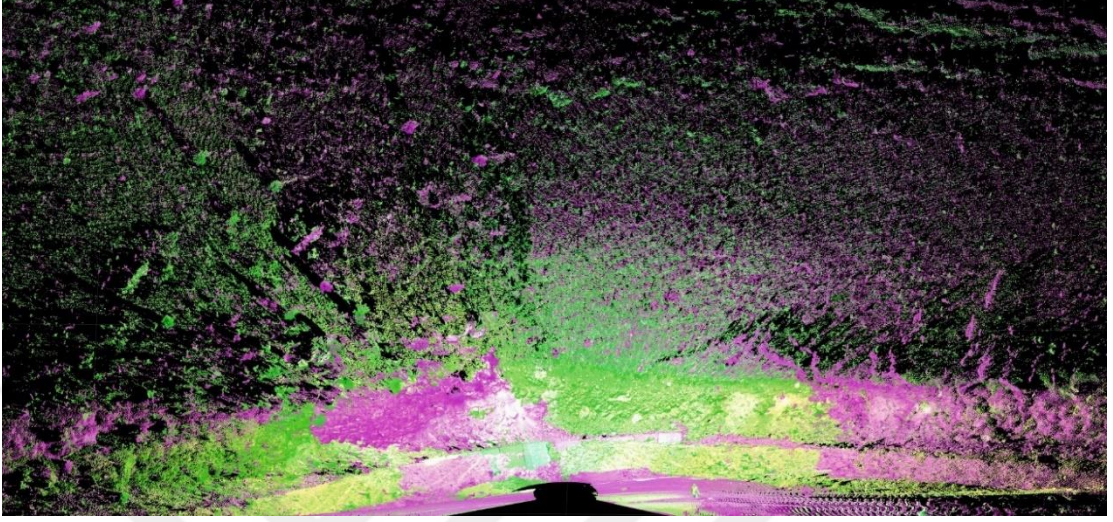


Şekil 4.25. Yol şevi nokta bulutlarının yansımaya görüntülerinden birleştirme sonuçları

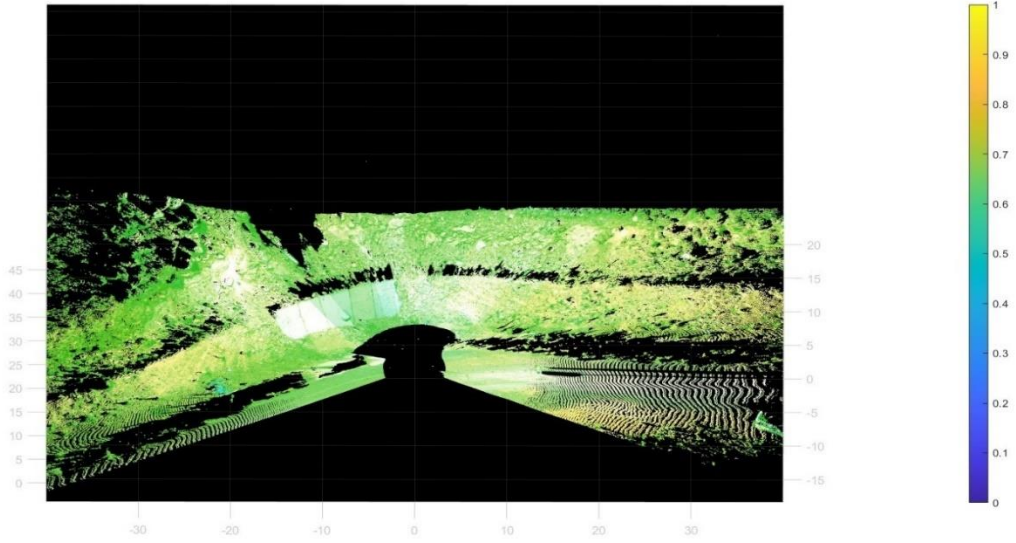
Eşlenik nokta seçimindeki zorluk nedeniyle birleştirme doğruluğu düşük çıkmıştır.

4.3.2. İteratif En Yakın Nokta Yöntemiyle Nokta Bulutlarının Birleştirilmesi

Nokta bulutlarının yaklaşık yöneltmesi yapıldıktan sonra İEYN yöntemi ile hassas dönüşüm uygulanmıştır (Şekil 4.26). Birleştirme sonuçları Şekil 4.27’de verilmiştir.

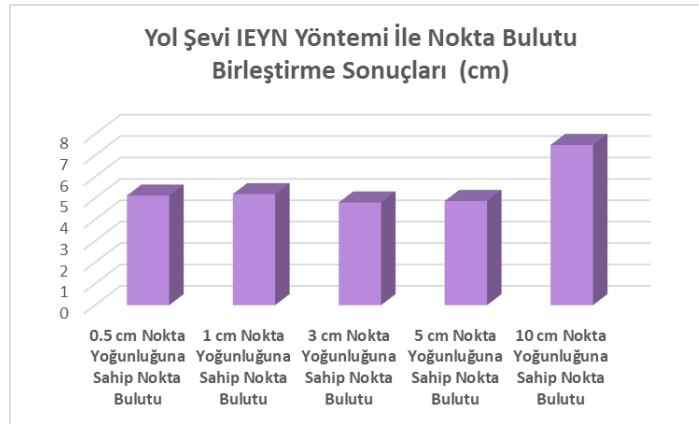


(a)



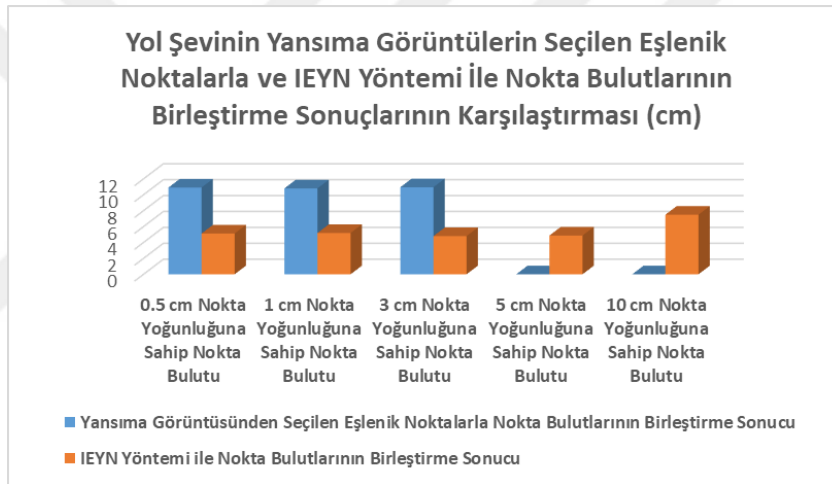
(b)

Şekil 4.26. Yol şevi İEYN yöntemi nokta bulutu birleştirme sonucu. (a) yaklaşık yöneltme, (b) İEYN ile birleştirilmiş nokta bulutu.



Şekil 4.27. Yol Şevinin iteratif en yakın nokta yöntemi ile nokta bulutlarının birleştirme sonuçları

Şekil 4.28’de yol şevi yansıma görüntülerinin birleştirme doğruluğu ve yol şevi nokta bulutlarının İEYN yöntemine göre birleştirme doğruluklarının karşılaştırması verilmiştir.

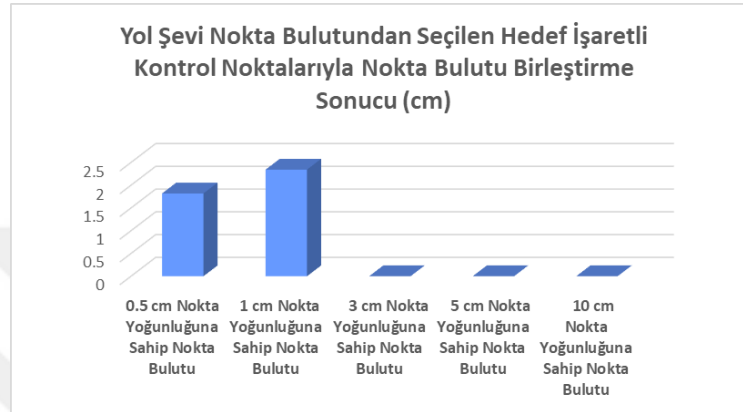


Şekil 4.28. Yol şevi nokta bulutlarının yansıma görüntüsünden seçilen eşlenik noktalarla ve İEYN yöntemi ile birleştirme sonuçlarının karşılaştırması (4 adet eşlenik nokta seçimi)

Yol şevi nokta bulutu birleştirme sonuçları incelendiğinde İEYN yönteminin, yansıma görüntülerinden eşlenik nokta seçimi yöntemine göre daha iyi sonuç verdiği görülmektedir. Bunun sebebi yol şevinin geometrik yüzeyidir. Yol şevi geometrik yüzeyinden oluşturulan yansıma görüntüsünden detay seçiminin güç olması yönteminin iyi çalışmasını güçleştirmiştir.

4.3.3. Nokta Bulutundan Seçilen Hedef İşaretli Kontrol Noktaları ile Nokta Bulutlarının Birleştirilmesi

İki nokta bulutunun ortak tarama alanına yerleştirilen hedef işaretlerinin nokta bulutundan seçilmesi ile iki nokta bulutu birleştirilmiştir. Birleştirmeler bu nokta bulutlarının farklı yoğunlukları için yapılmıştır. Birleştirme sonucunda elde edilen dönüşüm hataları Şekil 4.29'da verilmiştir.

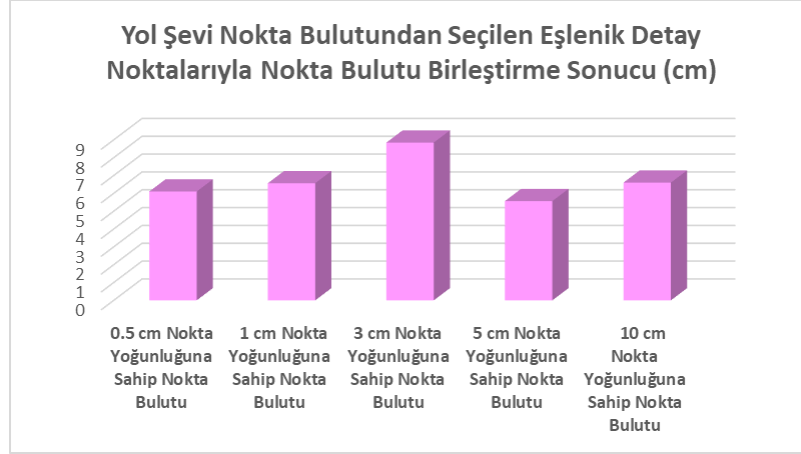


Şekil 4.29. Nokta bulutundan seçilen hedef işaretli kontrol noktalarıyla nokta bulutu birleştirme sonuçları

Elde edilen birleştirme doğruluğu 0,5 cm yoğunluk için ortalama 1,5 cm, 1 cm yoğunluk için ortalama 2 cm civarındadır. 3 cm, 5 cm ve 10 cm yoğunluğuna sahip taramalardan hedef işaretleri seçilemediği için birleştirme yapılamamıştır.

4.3.4. Nokta Bulutundan Seçilen Eşlenik Detay Noktaları ile Nokta Bulutlarının Birleştirilmesi

İki nokta bulutunun ortak tarama alanında seçilebilen belirgin detaylardan eşlenik noktalar oluşturulmuştur. Farklı yoğunlukta nokta bulutları seçilen 5 eşlenik nokta ile birleştirilmiştir. Birleştirme sonucunda elde edilen dönüşüm hataları Şekil 4.30'da verilmiştir.



Şekil 4.30. Nokta bulutundan seçilen eşlenik detay noktalarıyla nokta bulutu birleştirme sonuçları

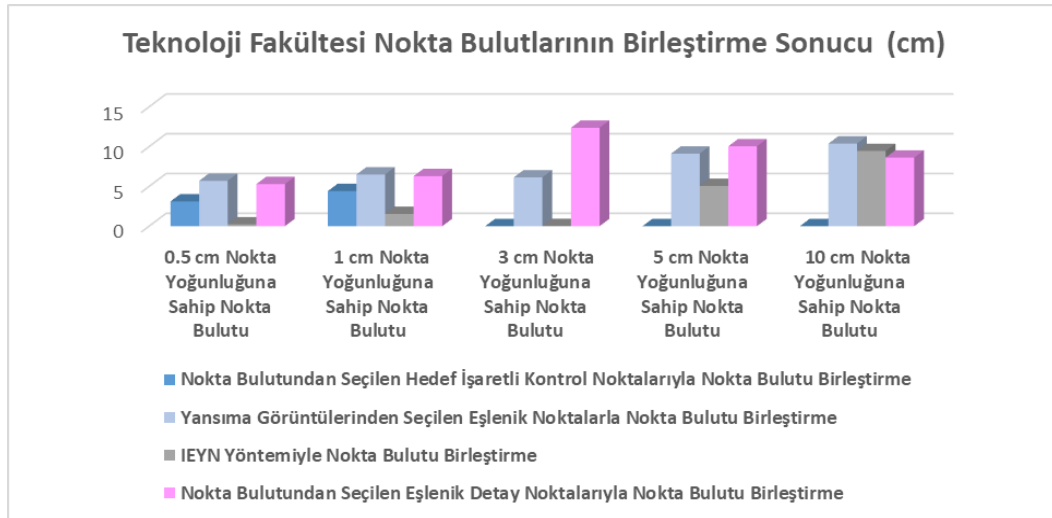
Bütün nokta yoğunlukları için benzer birleştirme sonuçları elde edilmiştir. Yoğun nokta bulutlarının birleştirilmesinde daha yüksek doğruluk elde edilmemiştir. Bunun nedeni detay seçimindeki zorluk olarak değerlendirilmiştir.

5. TARTIŞMA

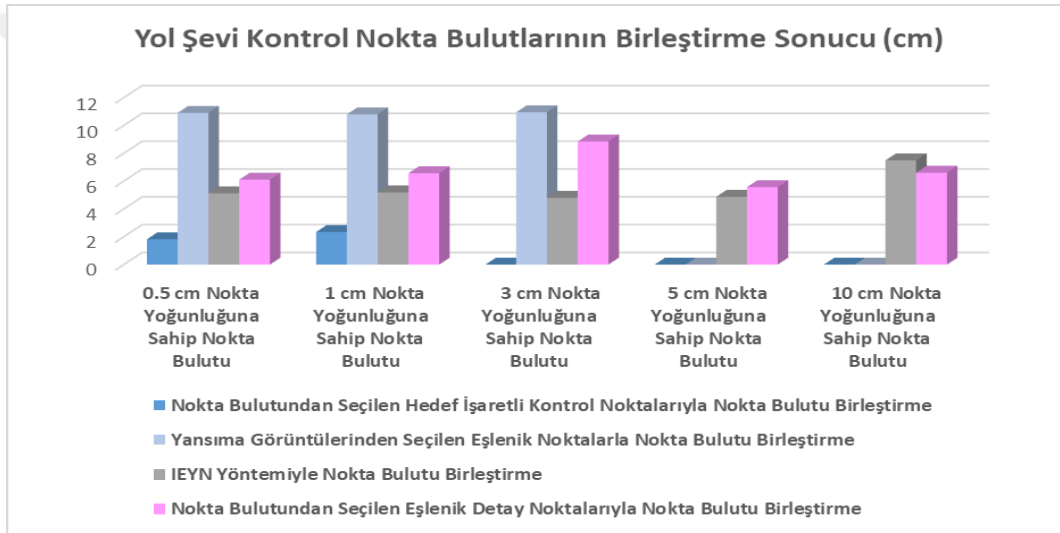
Yersel lazer tarayıcı nokta bulutlarının birleştirilmesi oldukça önemli bir işlem adıdır. Bu nedenle hâlâ önemli bir araştırma konusudur. Farklı geometrik özelliklere sahip yüzelerde farklı nokta bulutu birleştirme teknikleri kullanılabilir. Nokta bulutu birleştirme teknikleri yoğunluk, ölçme yüzeyi yapısı ve geometrisine bağlı olarak üstün ve zayıf yönleri bulunur.

5.1. Sonuçların Nokta Yoğunluğu Bakımından Değerlendirilmesi

Nokta yoğunluğunun azalması gerek nokta bulutundan gerekse yansıma görüntüsünden detay seçimini zorlaştırmıştır. Nokta yoğunluğunun azalması nokta bulutu birleştirme yöntemlerini farklı şekillerde etkilemiştir. Detayların net seçilemediği nokta bulutlarında eşlenik detay noktaları bulmak oldukça güçleşmiştir. Farklı nokta yoğunluğuna (0,5 cm, 1 cm, 3 cm, 5 cm ve 10 cm) sahip nokta bulutlarından yansıma görüntüleri başarılı bir şekilde elde edilmiştir. Ancak özellikle 5 cm ve 10 cm yoğunluklarına sahip nokta bulutlarından elde edilen yansıma görüntülerinde piksel boşlukları oluşmuştur. Oluşan piksel boşlukları 2B yansıma görüntüsü üzerinden eşlenik detayların seçimini oldukça güçleştirmiştir. Bu sebeple düşük veri yoğunluğuna sahip yansıma görüntülerinde nokta bulutu birleştirme sonuç doğruluğu düşmüştür (Şekil 5.1). Diğer yandan yol şevi örneğinde cisim yüzeyi detaylarının yansıma değerlerinin yakın olması ve nokta yoğunluğunun da düşük olması nedeniyle 5cm ve 10 cm yoğunlukta yansıma görüntülerinden eşlenik nokta seçimi yapılamamış ve nokta bulutları birleştirilememiştir (Şekil 5.2).



Şekil 5.1. Teknoloji Fakültesi dört yöntemle nokta bulutlarının birleştirme sonuçlarının karşılaştırması



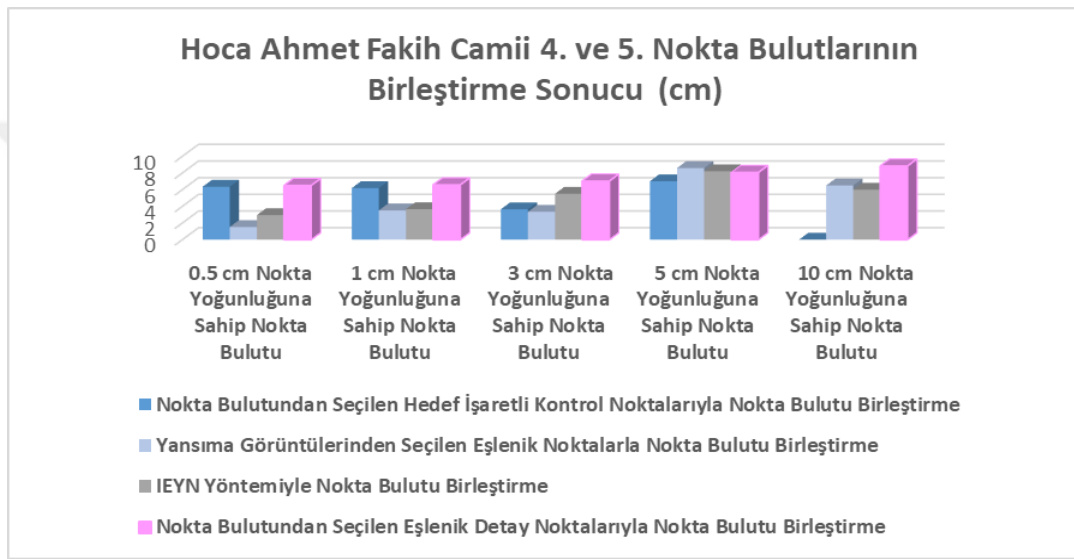
Şekil 5.2. Yol şevi nokta bulutlarının dört yöntemle göre birleştirme sonuçları

Birleştirme doğruluğu nokta yoğunluğundan en çok etkilenen yöntemin nokta bulutundan seçilen hedef işaretli kontrol noktalarıyla yapılan birleştirme yöntemi olduğu görülmüştür. Teknoloji fakültesi ve yol şevi örneklerinde 3 cm, 5 cm ve 10 cm yoğunluğa sahip nokta bulutundan hedef işaretleri seçilememiştir. Dolayısıyla bu nokta yoğunluklarında hedef işaretleri ile nokta bulutu birleştirilememiştir (Şekil 5.1, Şekil 5.2). Bu sebeple farklı yoğunluklardaki veri setlerinde yansıma görüntüsü oluşturmak detayların seçilebilmesini sağladığı için avantaj sağlamıştır.

Ölçme alanından seçilen detaylarla eşlenik nokta oluşturma ve birleştirme bütün nokta yoğunluklarında uygulanabilmiştir. Ancak nokta yoğunluğu arttıkça doğruluk azalmaktadır. Nokta bulutundan hedef işareti ya da detay seçiminde eşleşme doğruluğu nokta sıklığına doğrudan bağlıdır. Her iki yöntemde de seçilen nokta tarama noktası

olacaktır (Şekil 3.29). Tarama noktasının seyrek olması durumunda seçim doğruluğunun azalacağı açıktır. Diğer yandan eşlenik noktaların her iki nokta bulutunda seçim doğruluğu da farklı olacaktır. Dolayısıyla birleştirme doğruluğu seçim doğruluğuna bağlı olarak azalacaktır.

Nokta yoğunluğu bakımından sonuçları değerlendirdiğimizde en iyi yöntemin İEYN yöntemi olduğu görülmüştür. İEYN yöntemi birleştirme doğruluğu nokta yoğunluğundan en az etkilenen yöntemdir (Şekil 5.2, Şekil 5.3). Bunun sebebi eşlenik noktaların geometriye bağlı olarak otomatik seçilmesi ve çok sayıda eşlenik nokta ile dönüşüm parametrelerinin hesaplanmasıdır.



Şekil 5.3. Hoca Ahmet Fakih Camii dört yöntemin nokta bulutu birleştirme sonuç doğruluklarının karşılaştırması.

5.2. Sonuçların Ölçme Yüzeyi Özellikleri Bakımından Değerlendirilmesi

Çalışmamızda üç farklı geometrik yapıda yüzey seçilmiştir. Bunlar Hoca Ahmet Fakih Camii, teknoloji fakültesi ve yol şevidir. Hoca Ahmet Fakih Camii genel olarak kesme taştan inşa edilmiş olup camii duvarlarının üst kısmı ise betonarmeden yapılmıştır. Ayrıca camii pencere ve kapı gibi detaylarda barındırmaktadır. Camii'nin betonarmeden oluşan kısmı aynı yansıma özelliklerine sahip olduğundan yansıma görüntüsünde aynı gri renk tonuna sahip olmuştur. Camii'nin bu kısmında detay seçimi mümkün olmamıştır. Kesme taşlar, kapı ve pencere detayları farklı yansıma özelliklerine sahip olduğu için farklı gri renk tonlarıyla renklendirilebilmiştir. Camii'nin nokta bulutlarının birleştirilmesinde eşlenik detay seçimi yapılırken bu detaylar kullanılmıştır. Teknoloji fakültesi yüzeyi kapı ve çok sayıda pencere detayı barındırmaktadır. Bu detaylar yansıma

görüntüsünden eşlenik detay seçimini kolaylaştırmıştır. Tüm nokta yoğunluğuna sahip nokta bulutlarından birçok eşlenik detay seçilerek nokta bulutları birleştirilebilmiştir. Yol şevi geometrik yüzeyi taş, kaya parçası, kuru bitki örtüsü içermektedir. Bu detaylar yakın yansıma değerlerine sahiptir. Bu yüzden oluşturulan yansıma görüntülerinden eşlenik detayların seçimi çok zor olmuştur. Yol şevi yüzeyi için yansıma görüntülerinden seçilen eşlenik detaylarla nokta bulutu birleştirme yönteminin kısmen uygun olmadığını söyleyebiliriz (Şekil 5.2). Ancak diğer iki geometrik yüzey için elde edilen nokta bulutu birleştirme sonuçları incelendiğinde yöntemin başarılı olduğu görülmektedir (Şekil 5.1, Şekil 5.2). Bu bakımdan seçilen geometrik yüzeylerinde nokta bulutu birleştirme sonuç doğruluğunu etkilediği görülmüştür.

5.3. Sonuçların Yöntemler Bakımından Değerlendirilmesi

Çalışmada kullanılan dört yöntemin birbirine karşı avantajlı veya dezavantajlı yönleri vardır. Yansıma görüntüsü özellikle geometrik detayın az olduğu durumda eşlenik nokta oluşturma ve birleştirme sağlar. Diğer yandan nokta bulutu yerine fotoğraftan detay seçimi daha kolay yapılabilmektedir. Yansıma görüntüleri hem etkileşimli hem de otomatik birleştirme için uygundur. Otomatik birleştirmede özellik noktaları tespit edilerek eşlenik nokta oluşturulmaktadır.

Nokta bulutundan hedef işareti ya da detay seçimi zordur. Özellikle nokta yoğunluğunun düşük olması bu zorluğu daha da artırmaktadır. Renk değeri nokta bulutundan detay seçimini kolaylaştırır ancak renk içermeyen nokta bulutundan detay seçimi zordur. Hedef işaretli birleştirmede hedef işaretlerinin tarama alanında tesis edilmesi ekstra bir zaman ve maliyet gerektirir. Diğer yandan hedef işaretlerinin uygun dağılımda ve yeterli sayıda tesis edilebilmesi ayrı bir problemdir. Cisim detayları ile eşlenik nokta oluşturulması ve birleştirme nokta bulutlarının etkileşimli birleştirilmesinde tercih edilen bir yöntemdir. Özellikle belirgin detay noktaları bulunması ve nokta yoğunluğunun yeterli olması durumunda iyi sonuç verdiği görülmektedir (Şekil 5.2, Şekil 5.3).

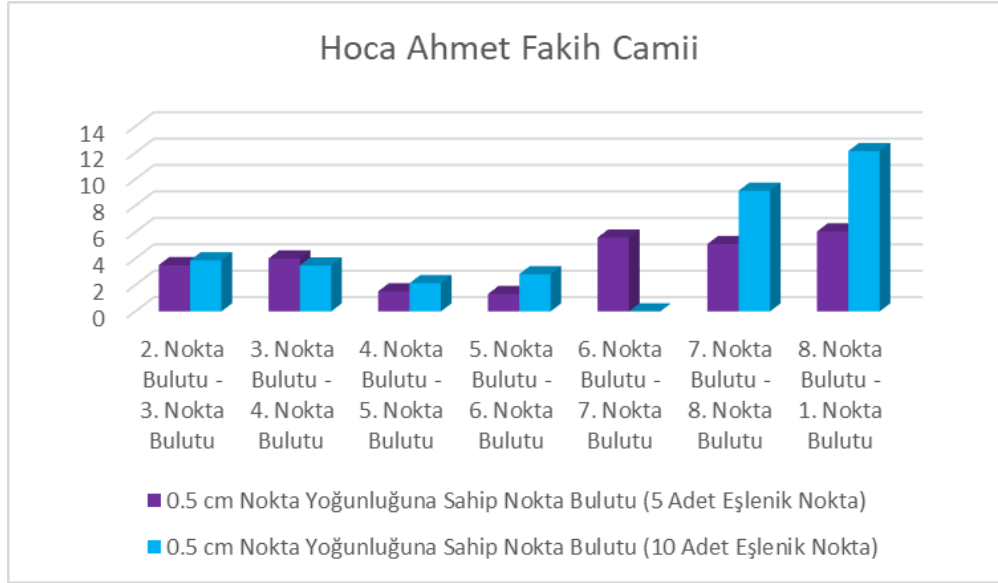
Teknoloji fakültesi ve yol şevinde nokta bulutundan seçilen hedef işaretli kontrol noktaları yönteminde 3 cm, 5 cm ve 10 cm nokta yoğunluğuna sahip nokta bulutlarından hedef işaretleri seçilemediği için birleştirilememiştir. Buna karşın yansıma görüntülerinde tüm nokta yoğunluklarında eşlenik detaylar seçilebilmiş ve nokta bulutları birleştirilebilmiştir. İEYN yönteminde de tüm nokta yoğunluklarındaki nokta bulutları

birleştirilebilmiştir. Özellikle Hoca Ahmet Fakih Camii'nde tüm nokta yoğunluklarındaki en iyi birleştirme sonucunu yansıma görüntülerinden seçilen eşlenik detaylarla nokta bulutu birleştirme yöntemi ve İEYN yönteminin sağladığı görülmüştür (Şekil 5.3).

Nokta bulutundan direkt seçilen eşlenik detay noktalarıyla nokta bulutlarının birleştirildiği yöntemde ise tüm nokta yoğunluğuna sahip nokta bulutları birleştirilebilmiştir. Ancak Hoca Ahmet Fakih Camii için yansıma görüntülerinin kullanıldığı yöntem ve İEYN yöntemine göre daha kötü doğruluk sağlamıştır. Yol şevi geometrik yüzeyinde ise yansıma görüntülerinin kullanıldığı yöntem göre yakın veya daha iyi sonuç vermiştir. İEYN yöntemi ise tüm nokta yoğunluklarında ve tüm geometrik yüzeylerde diğer üç yöntem göre daha yüksek doğruluk sağlamıştır. İEYN yöntemi yaklaşık yöneltme gerektirir ve hassas birleştirme sağlar. Yaklaşık yöneltmenin uygun yapılması durumunda birkaç iterasyon ile birleştirme yapılır. Diğer yöntemlere göre doğruluğu oldukça yüksektir. Dolayısıyla özellikle nokta bulutundan seçilen noktalarla yapılan birleştirmelere İEYN uygulanarak sonuçlar iyileştirilebilir.

5.4. Sonuçların Eşlenik Nokta Sayısı Bakımından Değerlendirilmesi

Nokta bulutlarının birleştirilmesinde manuel yöntemlerin kullanılması durumunda seçilen eşlenik detay noktası sayısı sonuç doğruluğunu etkiler. 3B benzerlik dönüşümünde eşlenik nokta sayısı belirli bir seviyeye kadar dönüşüm doğruluğunu olumlu etkiler. Bu seviyeden sonra eşlenik nokta sayısını arttırmak sonuç doğruluğuna çok fazla olumlu etki yapmaz. Çünkü sonuç doğruluğunda eşlenik noktaların sayısı kadar bunların dağılımı da etkilidir. Eşlenik nokta sayısı arttıkça bu noktaların homojen dağılımını da sağlamak zor olabilir. Ölçme alanındaki detay zenginliği bunu kısıtlayacaktır. Nitekim Hoca Ahmet Fakih Camii nokta bulutlarının birleştirilmesinde böyle bir durum görülmektedir (Şekil 5.4). Çalışmamızda 5 ve 10 adet eşlenik detay sayısı kullanılmıştır. Çalışma için seçilen tüm geometrik yüzeylerde 5 adet eşlenik detay seçimi ile yapılan birleştirmelerde daha iyi sonuç sağlanmıştır (Şekil 5.4). Diğer yandan nokta bulutu yoğunluğu düşük ise eşlenik nokta seçiminde oluşacak hatalar sonucu etkileyebilir. Bu durumda da eşlenik nokta sayısı artmasına rağmen birleştirme sonuç doğruluğu olumsuz etkilenebilir.



Şekil 5.4. Hoca Ahmet Fakih Camii 5 adet ve 10 adet eşlenik detay noktası ile nokta bulutu birleştirme sonucu karşılaştırması

Şekil 5.4'te görüldüğü üzere 10 adet eşlenik detay seçimi ile nokta bulutu birleştirme sonucu daha 5 adet eşlenik detay seçimine göre daha yüksek çıkmıştır. Ayrıca 6. ve 7. nokta bulutlarından 10 adet eşlenik detay bulunamadığı için birleştirilememiştir.

5.5. Sonuçların Model Doğruluğu Bakımından Değerlendirilmesi

Hoca Ahmet Fakih Camii'nde yansıma görüntüsünden seçilen eşlenik detay noktaları ve nokta bulutundan seçilen hedef işaretli kontrol noktaları ile 3B model oluşturulmuştur. Her iki yöntem ile oluşturulan modelde kontrol noktaları arasındaki model koordinatları ile elde edilen mesafeler total station ile ölçülen koordinatlardan elde edilen mesafelerle karşılaştırılmış ve belirgin bir fark bulunmamıştır (Çizelge 4.2). Bu sonuç ardışık birleştirme sağlayan bu iki yöntemin birikimsel hatalarının model doğruluğunu etkilemediğini göstermektedir. Model doğruluğu sonuçları yansıma görüntülerinden seçilen eşlenik noktalarla 3B model oluşturma yönteminin kullanılabilirliğini göstermiştir.

Ardışık ikili birleştirmelerden kaynaklanan birikimsel hataların model doğruluğuna etkisini azaltmak için kapalı lup oluşturan modellerde global birleştirme uygulanabilir. Açık lup şeritvari modellemede ise ölçme alanının ortasındaki bir tarama referans seçilerek her iki yöne doğru ardışık birleştirme yapılabilir (Altuntas, 2020).

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Yersel lazer tarayıcı nokta bulutlarının birleştirilmesi için birçok yöntem önerilmiştir. Bu yöntemlerin çoğunda 3B nokta bulutu üzerinden seçilen eşlenik detaylarla nokta bulutları birleştirilir. Ancak bazı geometrik yüzeylerde 3B nokta bulutu verilerinden detayların seçilmesi zor olmaktadır. Ayrıca özellikle yoğun nokta sıklıklarına (0,5 cm ve 1 cm) sahip 3B nokta bulutları büyük veri hacmine (yaklaşık 7 milyon nokta) sahiptir. Bu yüzden nokta bulutlarının birleştirilmesi hem yüksek performanslı iş istasyonu (32 çekirdek 160 GB RAM) hem de daha fazla zaman gerektirmektedir. Diğer yandan yeterli geometrik detay içermeyen nokta bulutları detay eşleme ile birleştirilemez. Dahası bu nokta bulutları İEYN ile dahi birleştirilemez. Ancak tarama alanı renk dokusu içeriyorsa noktalar için farklı yansıma değerleri elde edilecektir. Böyle durumlarda 3B nokta bulutu verilerinin içerdiği yansıma şiddetlerinden yararlanarak 2B yansıma görüntüleri elde edilebilir. Böylelikle ayrıntılar gri tonlarla renklendirildiğinden seçilebilir hale getirilebilir. Renkli detaylar sayesinde eşlenik noktalar oluşturulabilir. Çalışmamızda bu özellikten yararlanılmıştır. Yani farklı geometrik yüzeylerin yansıma özelliklerinin 2B yansıma görüntüsünden eşlenik detay seçimi ile nokta bulutu birleştirme doğruluğu araştırılmıştır. Buna ek olarak farklı geometrik yüzeylerin farklı nokta yoğunluklarında oluşturulan yansıma görüntülerinin eşlenik detay seçimine etkisi incelenmiştir. Sonuçlar literatürde en çok kullanılan yöntem olan İEYN yöntemiyle karşılaştırılmıştır. Ayrıca nokta bulutundan seçilen hedef işaretli kontrol noktalarıyla nokta bulutu birleştirme ve nokta bulutundan seçilen eşlenik detay noktaları ile de nokta bulutları birleştirilmiştir. Bu dört yöntemin sonuçları şu bilgilere ulaşmamızı sağlamıştır;

1. Farklı yansıma özelliklerine sahip geometrik yüzeyler yansıma görüntüsü oluşturmaya engel teşkil etmemiştir. Ancak yansıma özellikleri birbirine yakın yüzeylerde (yol şevi) yansıma görüntüsünden eşlenik detay seçimi zor olmuştur.
2. Yansıma görüntülerinden tüm nokta yoğunluklarında eşlenik detaylar seçilebilmiştir. Dolayısıyla nokta bulutları birleştirilebilmiştir. Nokta bulutundan hedef işaretli kontrol noktaları tüm nokta yoğunluklarında gerçekleştirilememiştir. Dolayısıyla bazı nokta bulutları birleştirilememiştir.
3. Yansıma görüntülerinden seçilen eşlenik detaylarla nokta bulutu birleştirme yöntemi nokta bulutundan seçilen eşlenik detaylarla ve nokta bulutundan hedef işaretli kontrol noktaları ile nokta bulutu birleştirme yöntemlerinden daha iyi

doğruluk sağlamıştır. İEYN yöntemi ile yakın sonuçlar elde edilmiştir. Hatta bazı nokta bulutlarında İEYN yönteminden daha iyi sonuç alınabilmektedir.

4. Eşlenik noktaların uygun dağılımda ve en az 5 adet olması birleştirme için yeterli doğruluk sağlar. Nokta sayısının artması doğruluğu bir miktar arttırabilir. Ancak nokta sayısı artarken homojen dağılımın bozulmamasına dikkat edilmelidir. İEYN yönteminde eşlenik detaylar otomatik seçilmekte ve çok sayıda eşlenik nokta oluşturulmaktadır. Dolayısıyla bu yöntemde gereğinden fazla sayıda eşlenik nokta ile dönüşüm uygulanmaktadır.
5. Farklı nokta yoğunluğuna sahip nokta bulutları İEYN yönteminin sonuç doğruluğunu az miktarda etkilerken diğer üç yöntemi daha olumsuz etkilemiştir. Çünkü nokta yoğunluğu azaldıkça karşılıklı nokta bulutlarından aynı detay noktasının seçimi zorlaşmaktadır.

Tüm bu durumlar göz önünde bulundurulduğunda farklı yansıma özellikleri içeren ancak geometrik detayları yetersiz olan nokta bulutları yansıma görüntüleri ile birleştirilebilir.

KAYNAKLAR

- Abdel-Aziz, Y. I., Karara, H. M. ve Hauck, M. 2015, Direct Linear Transformation from Comparator Coordinates into Object Space Coordinates in Close-Range Photogrammetry*. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 81, 103-107.
- Abmayr, T., Härtl, F., Hirzinger, G., Burschka, D. ve Fröhlich, C. 2008, Automatic registration of panoramic 2.5 d scans and color images. In *International Calibration and Orientation Workshop*.
- Alba, M., Barazzetti, L., Scaioni, M. ve Remondino, F. 2011, Automatic registration of multiple laser scans using panoramic RGB and intensity images. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, 38, W12.
- Alptekin, A., Çelik, M. Ö., Doğan, Y. ve Yakar, M. 2019, Mapping of a rockfall site with an unmanned aerial vehicle. *Mersin Photogrammetry Journal*, 1, 12-16.
- Altuntaş, C. 2011, Yersel Lazer Tarayıcı Nokta Bulutlarının Fotogrametrik Verilerle Birlikte Değerlendirilmesi Üzerine Bir Çalışma. Doktora Tezi. *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Harita Mühendisliği Anabilim Dalı*.
- Altuntas, C. 2012, İteratif en yakın nokta yöntemi ile lazer tarayıcı nokta bulutlarının birleştirilmesine analitik bir bakış. *Uzal CBS 2012 16-19 Ekim Zonguldak*.
- Altuntas, C. 2014, Pair-wise automatic registration of three-dimensional laser scanning data from historical building by created two-dimensional images. *Optical Engineering*, 53, 053108.
- Altuntas, C. 2015, Integration of point clouds originated from laser scanner and photogrammetric images for visualization of complex details of historical buildings. *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 40, 431.
- Altuntaş, C. 2017, Yersel lazer tarayıcı nokta bulutlarının birleştirilmesi ve jeodezik koordinat sistemine dönüştürülmesi: literatür araştırması. *Selçuk Teknik Online Dergi 16 (1): 12-43*
- Altuntas, C. 2020, Optik üç boyutlu ölçme teknikleri yayınlanmamış ders notu.
- Altuntaş, C. 2021, Uçuş zamanlı üç boyutlu ölçme teknikleri ve flash LiDAR. *18THBTK 26-29 Mayıs*.
- Altuntaş, C. ve Yıldız, F. 2008, Yersel lazer tarayıcı ölçme prensipleri ve nokta bulutlarının birleştirilmesi. *Jeodezi ve Jeoinformasyon Dergisi*, 2008/1 Sayı: 98 20-27.
- Altuntas, C., Yıldız, F. ve Scaioni, M. 2016, Laser scanning and data integration for three-dimensional digital recording of complex historical structures: The case of Mevlana Museum. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 5, 18.
- Amann, M.-C., Bosch, T., Lescure, M., Myllylae, R. ve Rioux, M. 2001, Laser ranging: a critical review of unusual techniques for distance measurement. *Optical Engineering*, 40(01), 10-19.
- Ashraf, I., Hur, S. ve Park, Y. 2017, An investigation of interpolation techniques to generate 2D intensity image from LIDAR data. *IEEE Access*, 5, 8250-8260.
- Aquilara, D.G., Gonzalves, P.R., Lahoz, J.G., 2009. An Automatic procedure for co-registration of terrestrial laser scanners and digital cameras, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* vol. 64, 308-316.
- Barfoot, T. D., McManus, C., Anderson, S., Dong, H., Beerepoot, E., Tong, C. H., Furgale, P., Gammell, J. D. ve Enright, J. 2016, Into darkness: Visual navigation based on a lidar-intensity-image pipeline. In *Robotics Research: The 16th International Symposium ISRR*, 487-504. Springer.

- Beland, M., Parker, G., Sparrow, B., Harding, D., Chasmer, L., Phinn, S., Antonarakis, A. ve Strahler, A. 2019, On promoting the use of lidar systems in forest ecosystem research. *Forest Ecology and Management*, 450, 117484.
- Besl, P. J. ve McKay, N. D. 1992, Method for registration of 3-D shapes. *Proc. SPIE 1611, Sensor Fusion IV: Control Paradigms and Data Structures*, (30 April 1992); <https://doi.org/10.1117/12.57955>
- Blais, F. ve Beraldin, J. A. 2006, Recent developments in 3D multi-modal laser imaging applied to cultural heritage. *Machine Vision and Applications*, 17, 395-409.
- Błaszczyk, M., Laska, M., Sivertsen, A. ve Jawak, S. D. 2022, Combined use of aerial photogrammetry and terrestrial laser scanning for detecting geomorphological changes in Hornsund, Svalbard. *Remote Sensing*, 14, 601.
- Boehler, W. ve Marbs, A. 2002, 3D scanning instruments. *Proceedings of the CIPA WG 6 International Workshop, Corfu, 1-2 September 2002*, 9-12.
- Böhm, J. ve Becker, S. 2007, Automatic marker-free registration of terrestrial laser scans using reflectance. In *Proceedings of the 8th conference on optical 3D measurement techniques, Zurich, Switzerland*, 9-12.
- Brenner, C., Dold, C. ve Ripperda, N. 2008, Coarse orientation of terrestrial laser scans in urban environments. *ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing*, 63, 4-18.
- Buck, U., Naether, S., Räss, B., Jackowski, C. ve Thali, M. J. 2013, Accident or homicide—virtual crime scene reconstruction using 3D methods. *Forensic science international*, 225, 75-84.
- Burdziakowski, P. ve Tysiac, P. 2019, Combined close range photogrammetry and terrestrial laser scanning for ship hull modelling. *Geosciences*, 9, 242.
- Büyüksalih, G., Akçın, H., Alkan, M., Kutoğlu, Ş. H., Kahya, Y. ve Şeker, D. Z. 2011, Kültürel mirasın kaydı, analizi, korunması ve yaşatılmasına yönelik bir bilgi ve yönetim sisteminin geliştirilmesi, örnek uygulama: Safranbolu tarihi kenti. Tübitak Projesi
- Cheng, Y.-T., Patel, A., Bullock, D. ve Habib, A. 2020, LiDAR-based Lane Marking Extraction through Intensity Thresholding and Deep Learning Approaches: A Pavement-based Assessment. *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 43, 507-514.
- Guo, J., Borges, P. V., Park, C. ve Gawel, A. 2019, Local descriptor for robust place recognition using lidar intensity. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 4, 1470-1477.
- Delaloye, D. 2012, Development of a new methodology for measuring deformation in tunnels and shafts with terrestrial laser scanning (LIDAR) using elliptical fitting algorithms. Msc Thesis, Queen's University (Canada).
- El-Hakim, S., Gonzo, L., Voltolini, F., Girardi, S., Rizzi, A., Remondino, F. ve Whiting, E. 2007, Detailed 3D modelling of castles. *International journal of architectural computing*, 5, 199-220.
- Elkhrachy, I. ve Niemeier, W. 2006, Optimization and strength aspects for georeferencing data with terrestrial laser scanner systems. In *Proc. 3rd IAG/12th FIG Symp, Baden, May 22-24*, 10.
- Feng, X., He, L., Cheng, Q., Long, X. ve Yuan, Y. 2020, Hyperspectral and multispectral remote sensing image fusion based on endmember spatial information. *Remote Sensing*, 12, 1009.
- Fidan, D. ve Fidan, Ş. 2021, Yersel lazer tarama teknolojileriyle oluşturulan 3B modellerin akıllı kent uygulamalarında kullanımı: Mersin Süslü Çeşme Örneği. *Türkiye Lidar Dergisi*, 3, 48-57.

- Fidan, D.,Oruç, M. E.,Hamal, S. N. G. ve Fidan, Ş. 2022, Tersine mühendislik uygulamalarında yersel lazer tarayıcıların kullanım olanaklarının araştırılması; klasik otomobiller örneği. *Türkiye Lidar Dergisi*, 4, 1-10.
- Giuffrida, D.,Nardo, V. M.,Neri, D.,Cucinotta, G.,Calabrò, I. V.,Pace, L. ve Ponterio, R. C. 2022, Terrestrial laser scanning for the modelling of indoor archaeological areas: two case-studies from Reggio Calabria, Italy. In *Journal of Physics: Conference Series*, 012075. IOP Publishing.
- Gosliga, V. R.,Lindenbergh, R. ve Pfeifer, N. 2006, Deformation analysis of a bored tunnel by means of terrestrial laser scanning. *IAPRS Volume XXXVI*, Part 5, Dresden 25-27 September, 167-172.
- Grün, A.,Remondino, F. ve Zhang, L. 2004, Photogrammetric reconstruction of the great Buddha of Bamiyan, Afghanistan. *The Photogrammetric Record*, 19, 177-199.
- Güllü, M.,Tuşat, E.,Baybura, T. ve Turgut, B. 2018, Üç boyutlu koordinat dönüşüm yöntemlerinin incelenmesi. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 18, 250-255.
- Gwenzi, D. 2017, Lidar remote sensing of savanna biophysical attributes: opportunities, progress, and challenges. *International Journal of Remote Sensing*, 38, 235-257.
- Hill, R. A. ve Broughton, R. K. 2009, Mapping the understorey of deciduous woodland from leaf-on and leaf-off airborne LiDAR data: A case study in lowland Britain. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 64, 223-233.
- Ingensand, H. 2006, Metrological aspects in terrestrial laser-scanning technology. In *Proceedings of the 3rd IAG/12th FIG symposium, Baden 22-24, Austria*.
- Jaakkola, A.,Hyypä, J.,Hyypä, H. ve Kukko, A. 2008, Retrieval Algorithms for Road Surface Modelling Using Laser-Based Mobile Mapping. *Sensors*, 8, 5238-5249.
- Jacobs, M.,Hilmers, T.,Leroy, B. M.,Lemme, H.,Kienlein, S.,Müller, J.,Weisser, W. W. ve Pretzsch, H. 2022, Assessment of defoliation and subsequent growth losses caused by Lymantria dispar using terrestrial laser scanning (TLS). *Trees*, 36, 819-834.
- Kaçarlar, Z. ve Hamal, S. N. G. 2021, Küçük objelerin üç boyutlu (3B) modellenmesinde yersel lazer tarama (YLT) tekniği. *Türkiye Lidar Dergisi*, 3, 65-70.
- Kang, Z., Li, J., Zhang, L., Zhao, Q., Zlatanova, S. 2009, Automatic Registration of Terrestrial Laser Scanning Point Clouds using Panoramic Reflectance Images. *Sensors*, 9, 2621-2646. <https://doi.org/10.3390/s90402621>
- Kang, Z. ve Lu, Z. 2011, The change detection of building models using epochs of terrestrial point clouds. In *2011 International Workshop on Multi-Platform/Multi-Sensor Remote Sensing and Mapping*, 10-120 January. Xiamen China. 11772314 1-6. IEEE.
- Kang, Z. ve Zlatanova, S. 2007, Automatic registration of terrestrial scan data based on matching corresponding points from reflectivity images. In *2007 Urban Remote Sensing Joint Event*, Paris France 1-7. IEEE.
- Kedzierski, M. ve Fryskowska, A. 2015, Methods of laser scanning point clouds integration in precise 3D building modelling. *Measurement*, 74, 221-232.
- Khrachy, I.,Abd, E. ve Hamid, M. 2008, Towards an automatic registration for terrestrial laser scanner data, PhD Thesis. Technischen Universität at Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig.
- Kobler, A.,Pfeifer, N.,Ogrinc, P.,Todorovski, L.,Oštir, K. ve Džeroski, S. 2007, Repetitive interpolation: A robust algorithm for DTM generation from Aerial Laser Scanner Data in forested terrain. *Remote Sensing of Environment*, 108, 9-23.
- Kraus, K. 2007, Photogrammetry: Geometry from Images and Laser Scans. de Gruyter.

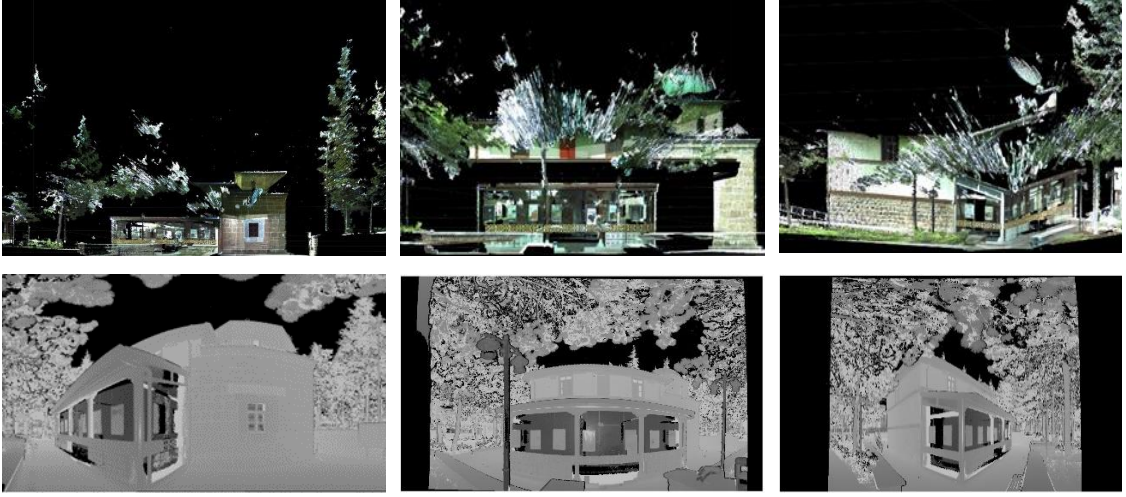
- Kurban, T., Beşdok, E. 2018, 3 Dimensional point cloud registration using global optimization techniques, 26 th signal processing and communications applications conference. İzmir, Türkiye, 2-5 Mayıs, 1-4.
- Lastilla, L., Ravanelli, R. ve Ferrara, S. 2019, 3D High-quality modeling of small and complex archaeological inscribed objects: relevant issues and proposed methodology. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences*.
- Lemy, F., Yong, S. ve Schulz, T. 2009, A case study of monitoring tunnel wall displacement using laser scanning technology. In *Proceedings of 10th IAEG Congress' Engineering Geology for Tomorrow's cities', Nottingham, September 6-10, 2006*, 482. The Geological Society of London.
- Li, S., Hou, Z., Ge, J. ve Wang, T. 2022, Assessing the effects of large herbivores on the three-dimensional structure of temperate forests using terrestrial laser scanning. *Forest Ecology and Management*, 507, 119985.
- Lichti, D. ve Harvey, B. 2002, An investigation into the effects of reflecting surface material properties on terrestrial laser scanner measurements. *Geomatics Research Australasia*, 76, 1-22.
- Lichti, D., Stewart, M., Tsakiri, M. ve Snow, A. 2000, Benchmark tests on a three-dimensional laser scanning system. *Geomatics Research Australasia*, 72, 1-24.
- Lichti, D. D. ve Gordon, S. 2004, Error Propagation in Directly Georeferenced Terrestrial Laser Scanner Point Clouds for Cultural Heritage Recording. *FIG Working Week 2004 Athens, Greece, May 22-27, 2004*.
- Lim, K., Treitz, P., Wulder, M., St-Onge, B. ve Flood, M. 2003, LiDAR remote sensing of forest structure. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 27, 88-106.
- Lindenbergh, R., Pfeifer, N. ve Rabbani, T. 2005, Accuracy analysis of the Leica HDS3000 and feasibility of tunnel deformation monitoring. Workshop "Laser scanning 2005", Enschede, the Netherlands, September, ISPRS WG III/3, III/4, V/3, 12-14.
- Makreshanski, D. 2010, Automatic marker-free registration of terrestrial laser scans based on SIFT features from reflectance images. Bachelor's Thesis. Jacobs University School of Engineering and Science.
- Masciotta, M. G., Sanchez-Aparicio, L. J., Oliveira, D. V. ve Gonzalez-Aguilera, D. 2022, Integration of laser scanning technologies and 360° photography for the digital documentation and management of cultural heritage buildings. *International Journal of Architectural Heritage*, 17(1): 56-75.
- Murphy, M., McGovern, E. ve Pavia, S. 2013, Historic Building Information Modelling—Adding intelligence to laser and image based surveys of European classical architecture. *ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing*, 76, 89-102.
- Muumbe, T. P., Baade, J., Singh, J., Schullius, C. ve Thau, C. 2021, Terrestrial laser scanning for vegetation analyses with a special focus on savannas. *Remote Sensing*, 13, 507.
- Olsen, J., Kuester, F., Chang Barbara, J. ve Hutchinson Tara, C. 2010, Terrestrial laser scanning-based structural damage assessment. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 24, 264-272.
- Oreni, D., Brumana, R., Della Torre, S., Banfi, F., Barazzetti, L. ve Previtali, M. 2014, Survey turned into HBIM: the restoration and the work involved concerning the Basilica di Collemaggio after the earthquake (L Aquila). *ISPRS Ann. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, II-5, 267–273.

- Özdoğan, M. V. ve Deliormanlı, A. H. 2022, Yersel lazer tarayıcıların yeraltı madencilik faaliyetlerinde kullanımı: örnek bir yeraltı metalik maden uygulaması. *MT Bilimsel*, 21, 13-19.
- Petrie, G. ve Toth, C. K. 2017, *Terrestrial laser scanners*. In *Topographic Laser Ranging and Scanning*, 87-128. CRC Press.
- Pfeifer, N. ve Briese, C. 2007, Laser scanning—principles and applications. In *Geosiberia 2007-international exhibition and scientific congress*, Nowosibirsk, Russia, April 2007, 93-112.
- Pu, S., Rutzinger, M., Vosselman, G. ve Oude Elberink, S. 2011, Recognizing basic structures from mobile laser scanning data for road inventory studies. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 66, S28-S39.
- Remondino, F. 2011, Heritage recording and 3D modeling with photogrammetry and 3D scanning. *Remote sensing*, 3, 1104-1138.
- Remondino, F. ve Boehm, J. 2013, Theme section" Terrestrial 3D Modeling". *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 76, 31-32.
- Reshetyuk, Y. 2006, Investigation and calibration of pulsed time-of-flight terrestrial laser scanners. PhD Thesis, KTH.
- Rietdorf, A. 2005, Automatisierte Auswertung und Kalibrierung von scannenden Messsystemen mit tachymetrischem Messprinzip. PhD Thesis. Technical University Berlin.
- Sarıtaş, M. Z. 2015, Adli tıp uygulamalarında 3D (üç boyutlu) teknolojinin kullanımı. Uzmanlık Tezi, Pamukkale Üniversitesi Tıp Fakültesi
- Schlemmer, H. 1996, Grundlagen der Sensorik: Eine Instrumentenkunde für Vermessungsingenieure. ISBN: 978-3-87907-278-1. Wichmann.
- Schulz, T. 2008, Calibration of a terrestrial laser scanner for engineering geodesy. ETH Zurich. PhD Thesis, ETH Zurich
- Sinha, S., Jeganathan, C., Sharma, L. K. ve Nathawat, M. S. 2015, A review of radar remote sensing for biomass estimation. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 12, 1779-1792.
- Şahin, C. 2011, Taksim Cumhuriyet Meydanı örneğinde fotogrametri ve lazer tarama verileriyle bütünleşik 3B kent modeli üretimi. Doktora Tezi. Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Wang, X. ve Li, P. 2020, Extraction of urban building damage using spectral, height and corner information from VHR satellite images and airborne LiDAR data. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 159, 322-336.
- Wang, Z. ve Brenner, C. 2008, Point based registration of terrestrial laser data using intensity and geometry features. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 37, 583-589.
- Wietrzykowski, J. ve Skrzypczyński, P. 2021, On the descriptive power of LiDAR intensity images for segment-based loop closing in 3-D SLAM. In *2021 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 79-85. IEEE.
- Yan, S., Yang, G., Li, Q., Zhang, B., Wang, Y., Zhang, Y. ve Wang, C. 2021, Distance–Intensity Image Strategy for Pulsed LiDAR Based on the Double-Scale Intensity-Weighted Centroid Algorithm. *Remote Sensing*, 13, 432.
- Zhu, B., Ye, Y., Zhou, L., Li, Z. ve Yin, G. 2021, Robust registration of aerial images and LiDAR data using spatial constraints and Gabor structural features. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 181, 129-147.
- Zogg, H.-M. 2008, Investigations of high precision terrestrial laser scanning with emphasis on the development of a robust close-range 3D-laser scanning system. PhD Thesis. ETH Zurich.

EKLER

EK-1 Hoca Ahmet Fakih Camii 0,5 cm, 1 cm, 3 cm, 5cm ve 10 cm yoğunluklarına sahip bindirmeli nokta bulutları ve bu nokta bulutlarından elde edilen yansıma görüntüleri

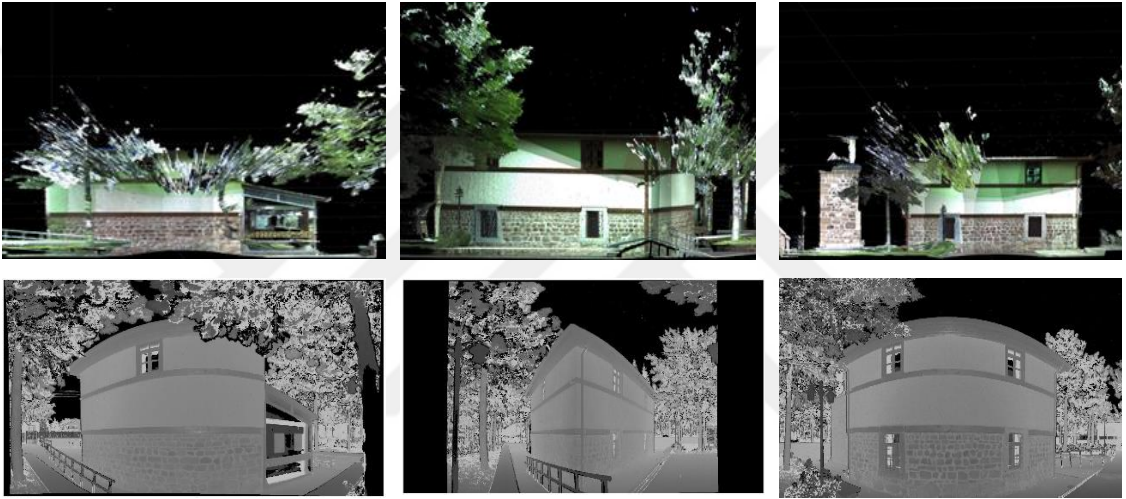




1. Tarama açısı

2. Tarama açısı

3. Tarama açısı



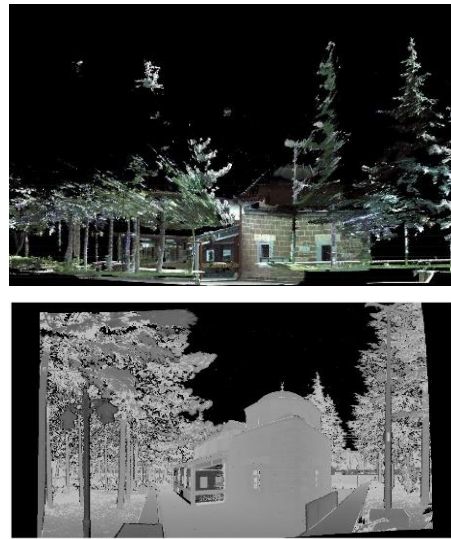
4. Tarama açısı

5. Tarama açısı

6. Tarama açısı

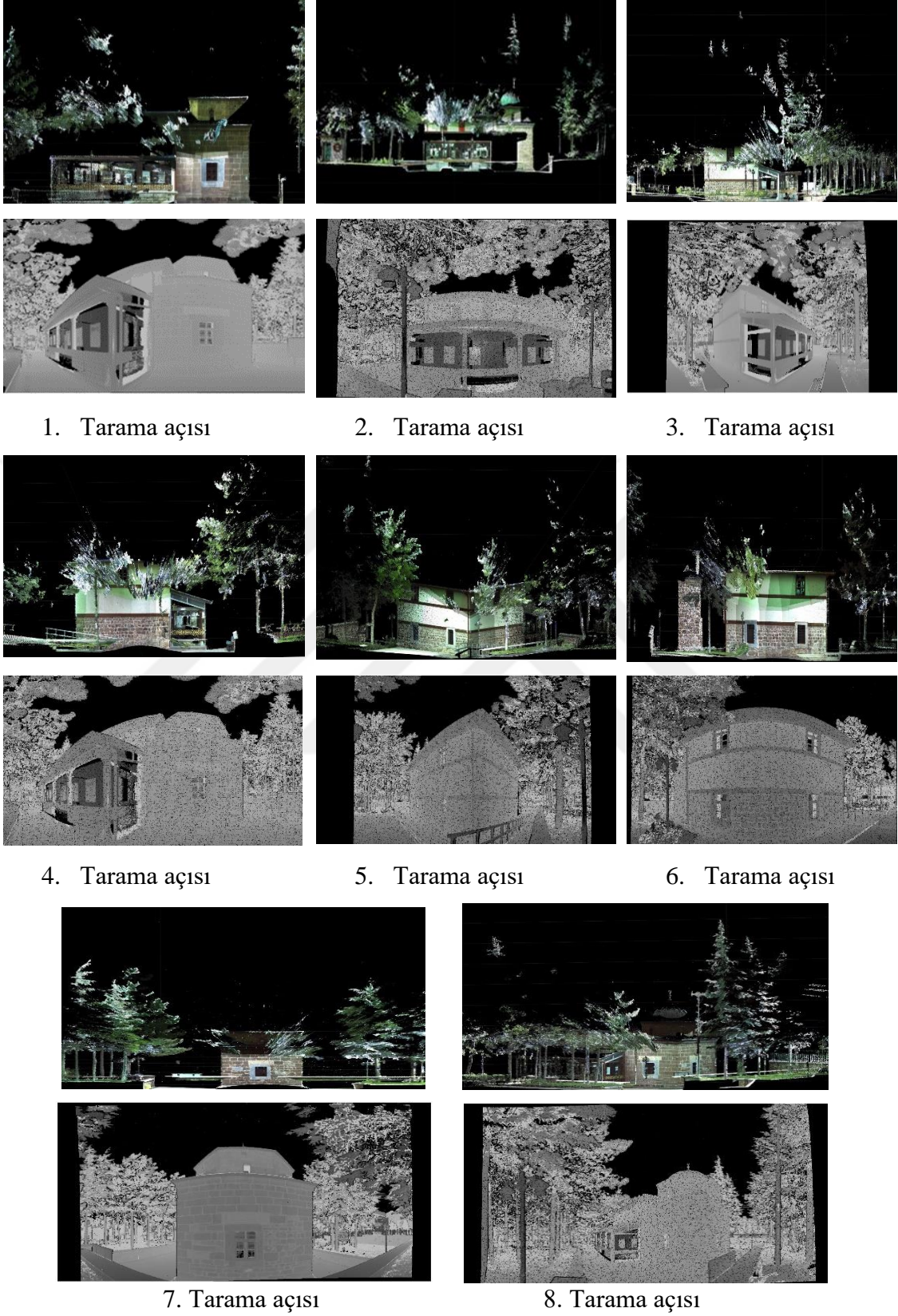


7. Tarama açısı

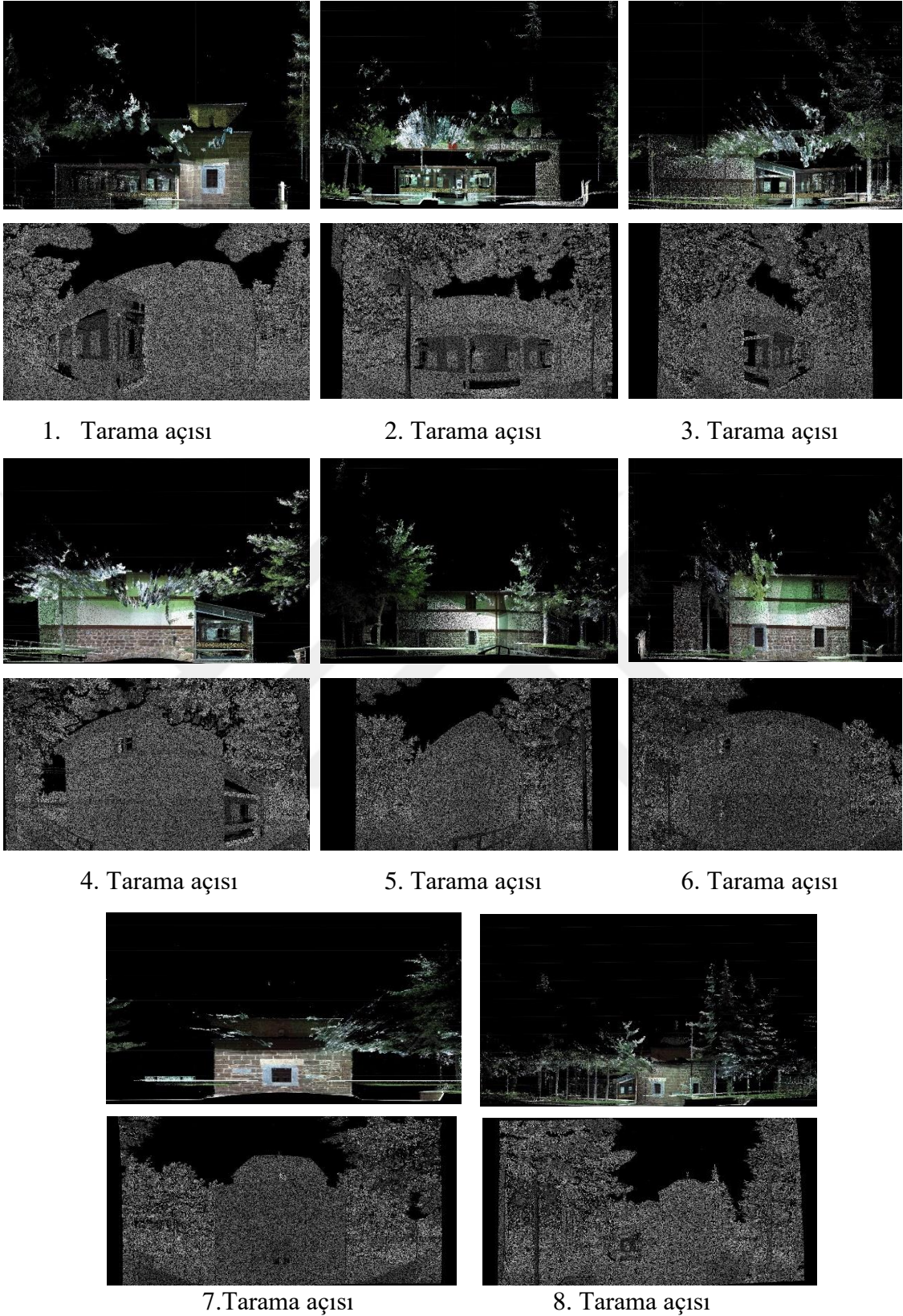


8. Tarama açısı

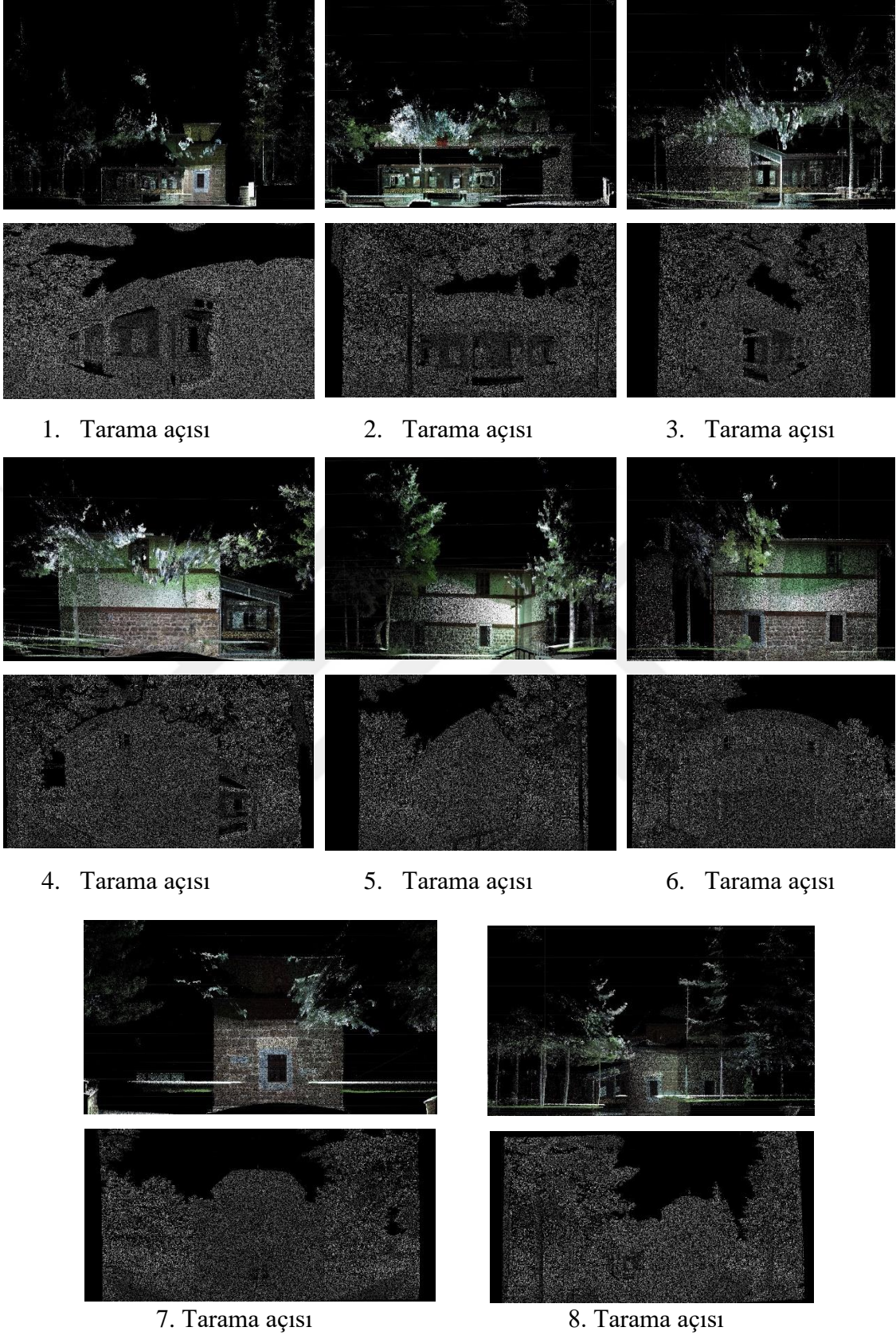
Şekil EK-1.1. Hoca Ahmet Fakih Camii'nin 8 farklı tarama istasyonundan 0,5 cm yoğunlukta nokta bulutu (üst) ve nokta bulutuna ait yansıma görüntüleri (alt).



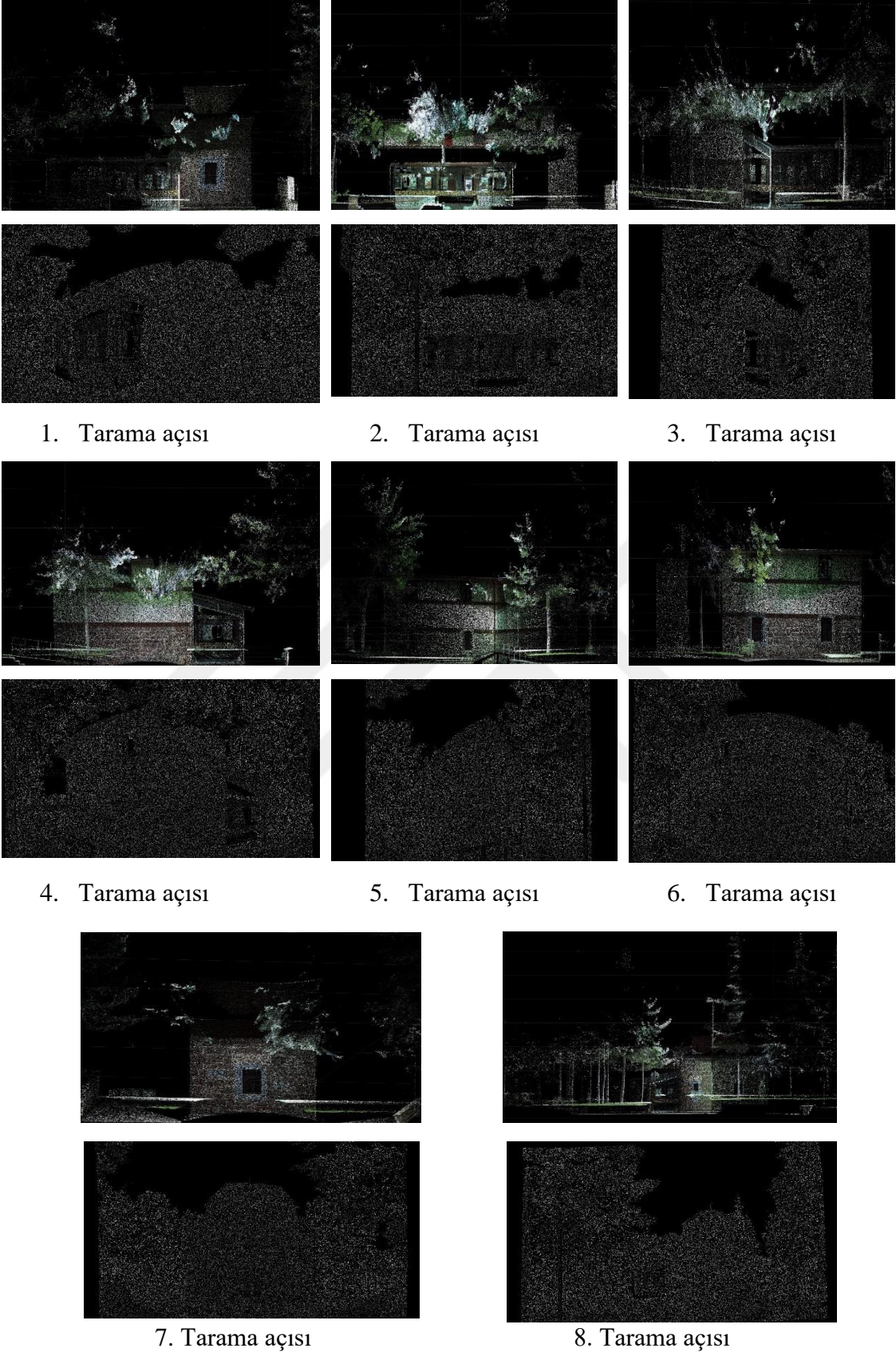
Şekil EK-1.2. Hoca Ahmet Fakih Camii'nin 8 farklı tarama istasyonundan 1 cm yoğunlukta nokta bulutu ve nokta bulutuna ait yansımaya görüntüleri.



Şekil EK-1.3. Hoca Ahmet Fakih Camii'nin 8 farklı tarama istasyonundan 3 cm yoğunlukta nokta bulutu ve nokta bulutuna ait yansıma görüntüleri.

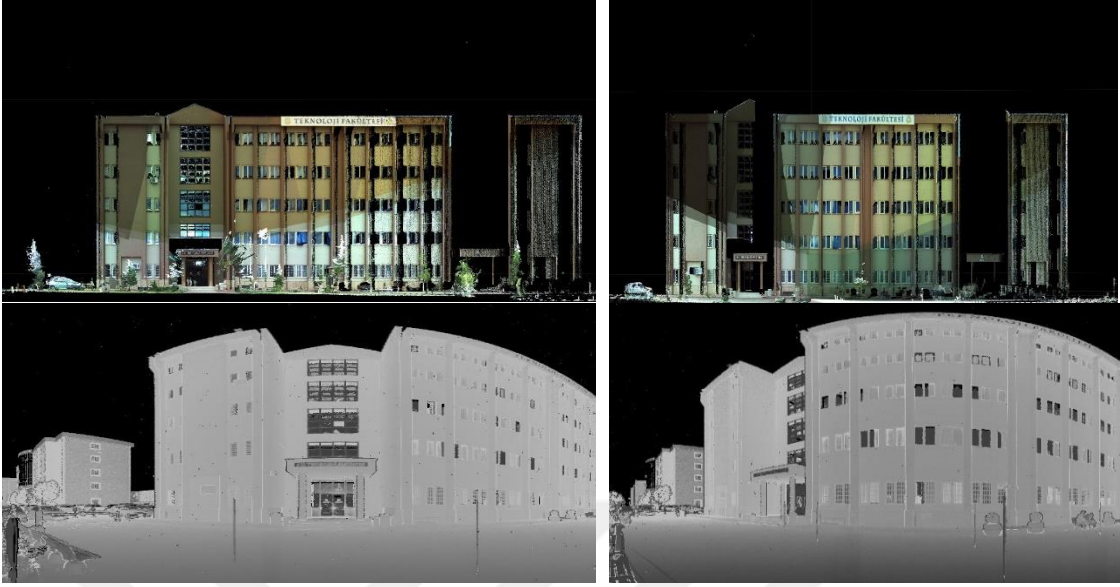


Şekil EK-1.4. Hoca Ahmet Fakih Camii'nin 8 farklı tarama istasyonundan 5 cm yoğunlukta nokta bulutu ve nokta bulutuna ait yansıma görüntüleri.

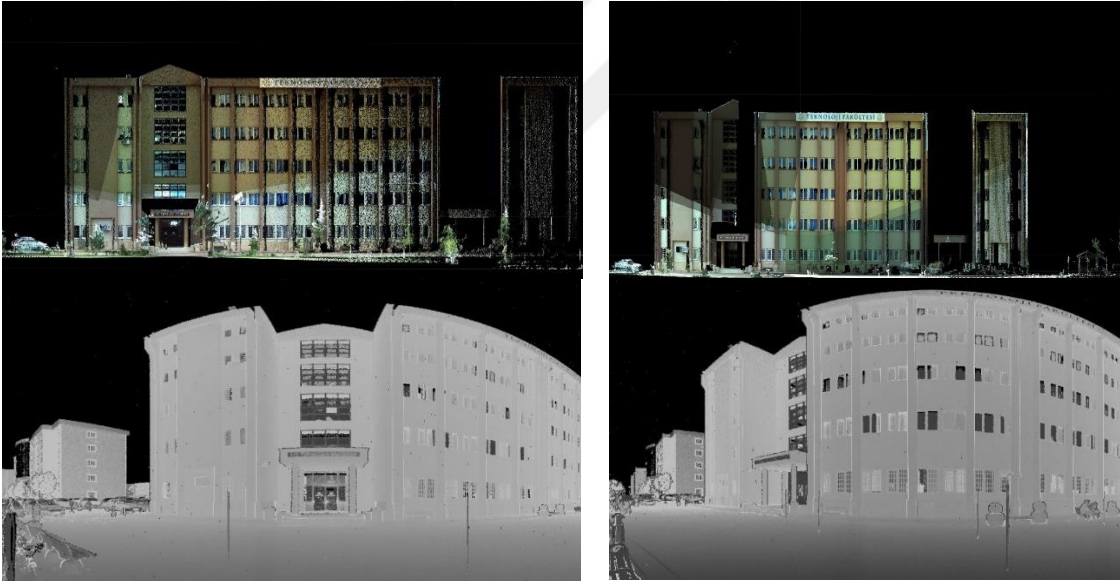


Şekil EK-1.5. Hoca Ahmet Fakih Camii'nin 8 farklı tarama istasyonundan 10 cm yoğunlukta nokta bulutu ve nokta bulutuna ait yansıma görüntüleri.

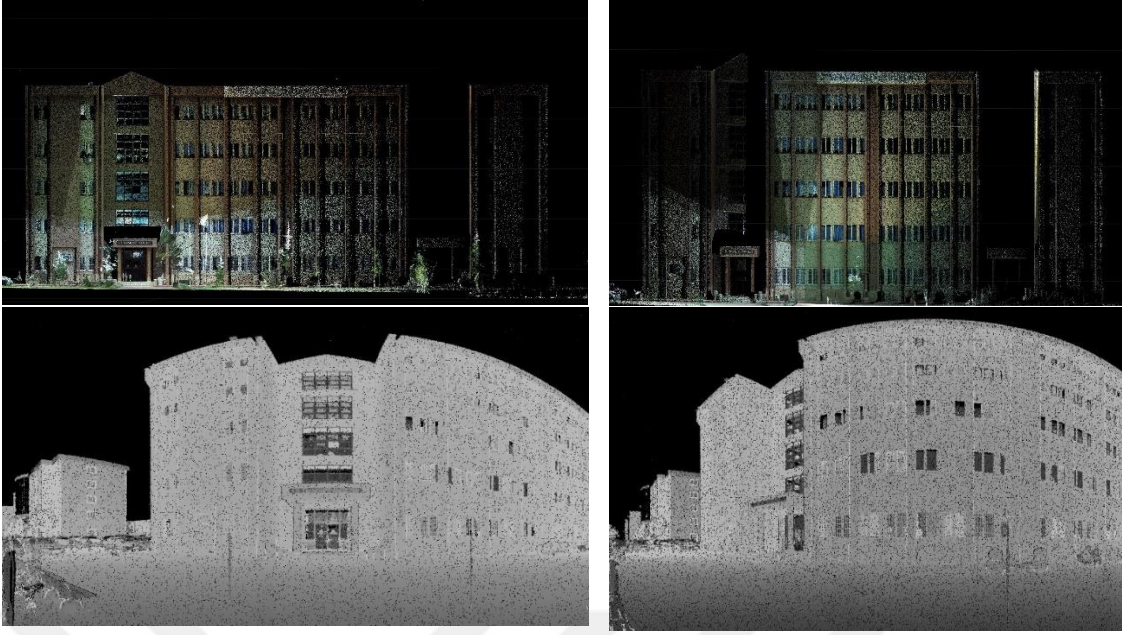
EK-2 Teknoloji Fakültesi 0,5 cm, 1 cm, 3 cm, 5cm ve 10 cm yoğunluklarına sahip bindirmeli nokta bulutları ve bu nokta bulutlarından elde edilen yansımaya görüntüleri



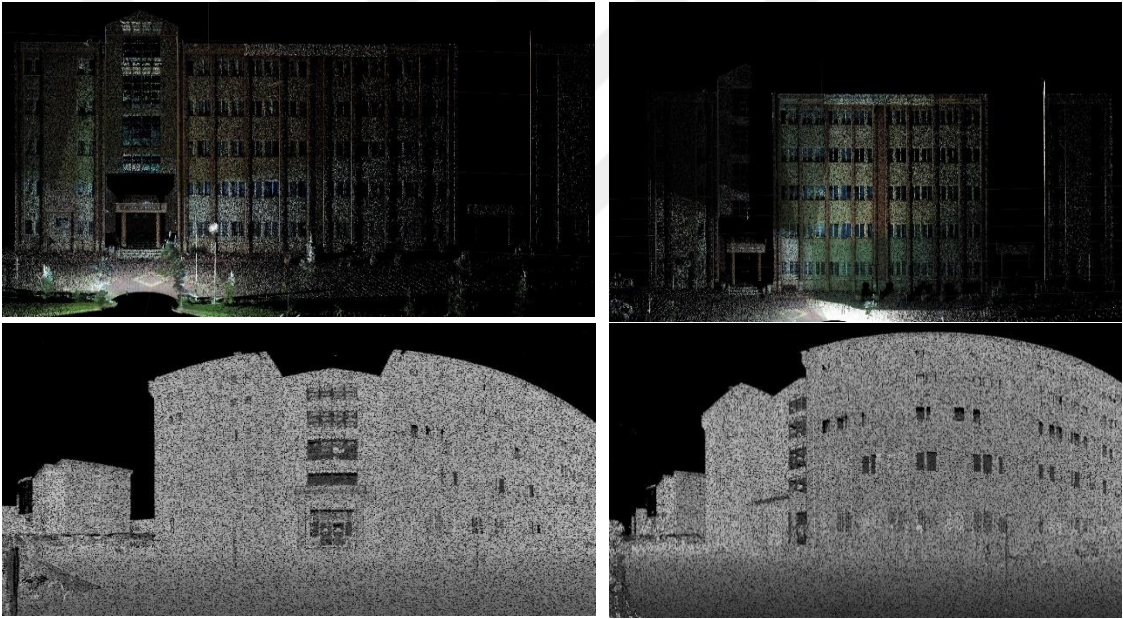
0,5 cm nokta yoğunluğundaki bindirmeli nokta bulutları ve bu nokta bulutlarına ait yansımaya görüntüleri



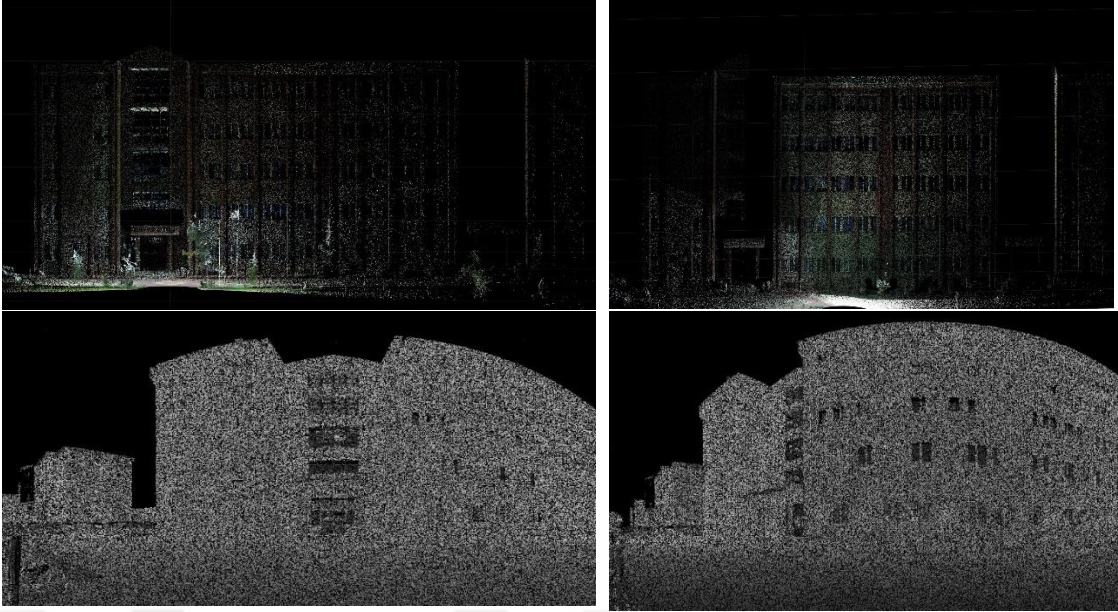
1 cm nokta yoğunluğundaki bindirmeli nokta bulutları ve bu nokta bulutlarına ait yansımaya görüntüleri



3 cm nokta yoğunluğundaki bindirmeli nokta bulutları ve bu nokta bulutlarına ait yansıma görüntüleri



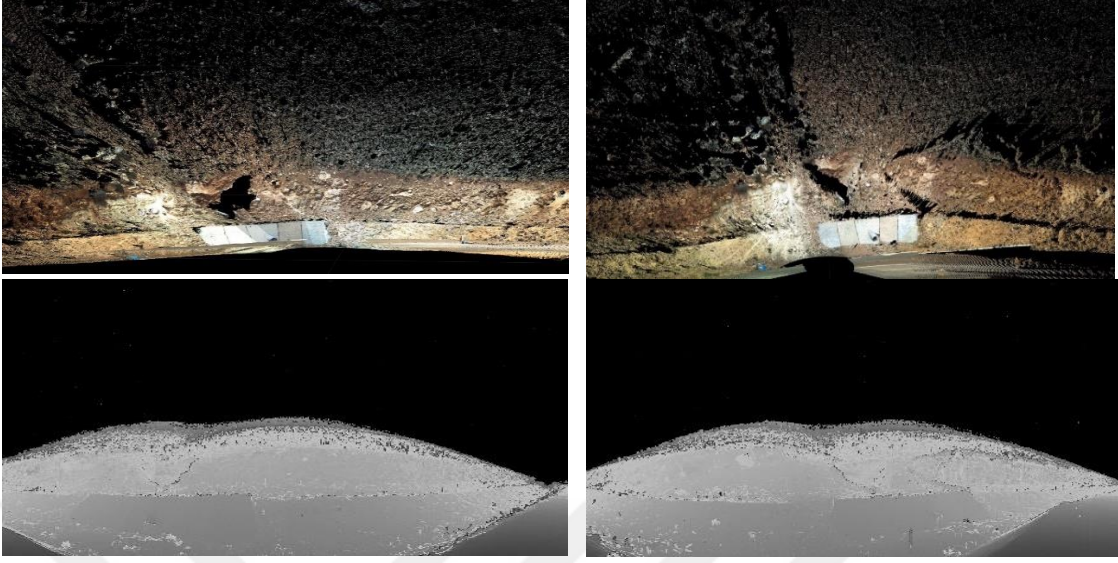
5 cm nokta yoğunluğundaki bindirmeli nokta bulutları ve bu nokta bulutlarına ait yansıma görüntüleri



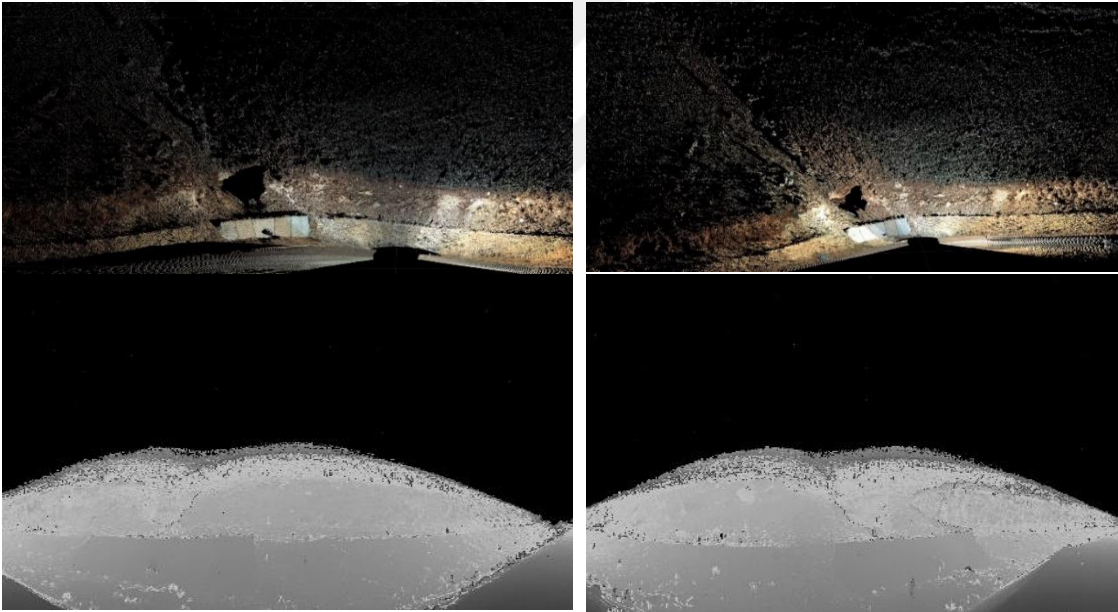
10 cm nokta yoğunluğundaki bindirmeli nokta bulutları ve bu nokta bulutlarına ait yansıma görüntüleri

Şekil EK-2.1. Teknoloji fakültesinin 1. ve 2. tarama istasyonundan 0,5 cm, 1 cm, 3 cm, 5 cm ve 10 cm nokta sıklıklarına sahip nokta bulutu ve bu nokta bulutundan elde edilen yansıma görüntülerinin gösterimi.

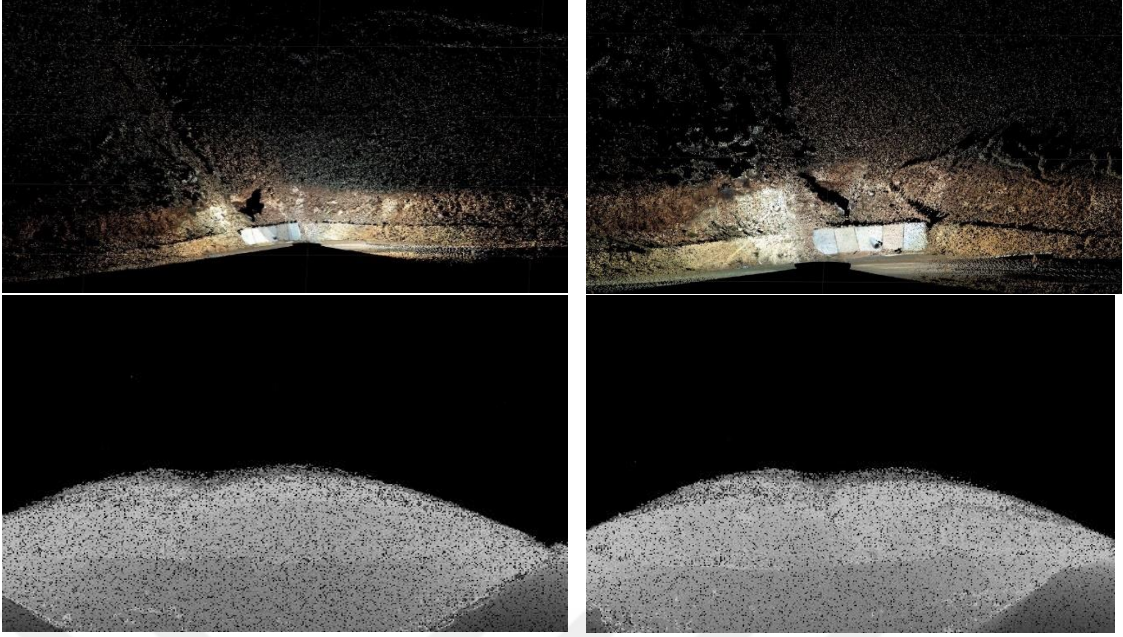
EK-3 Yol şevi 0,5 cm, 1 cm, 3 cm, 5cm ve 10 cm yoğunluklarına sahip bindirmeli nokta bulutları ve bu nokta bulutlarından elde edilen yansımaya görüntüleri



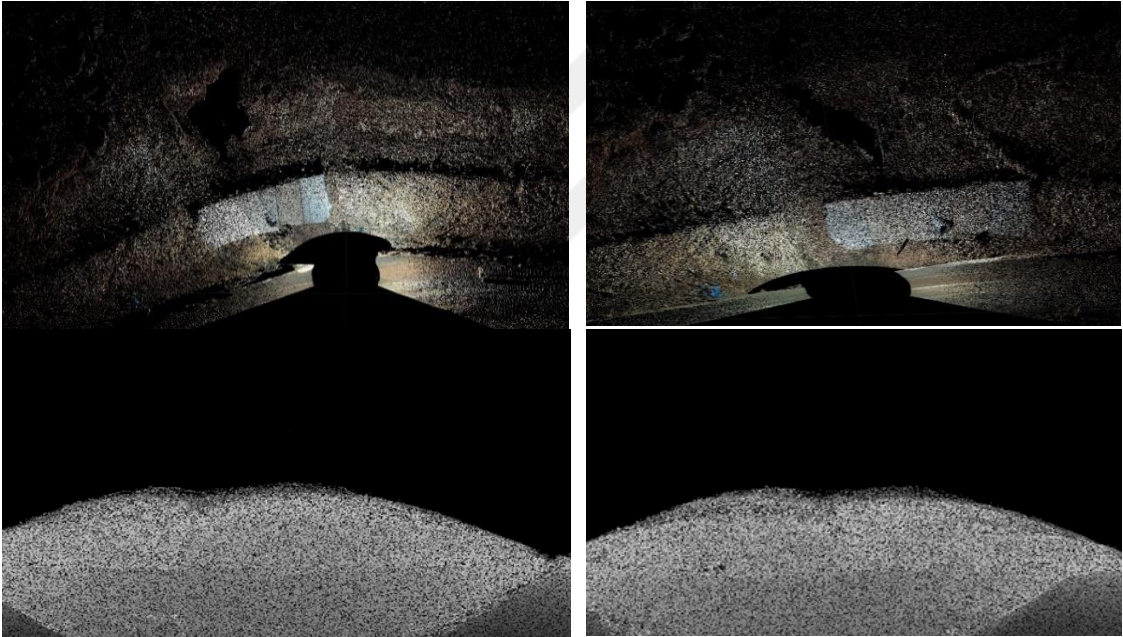
0,5 cm nokta yoğunluğundaki bindirmeli nokta bulutları ve bu nokta bulutlarına ait yansımaya görüntüleri



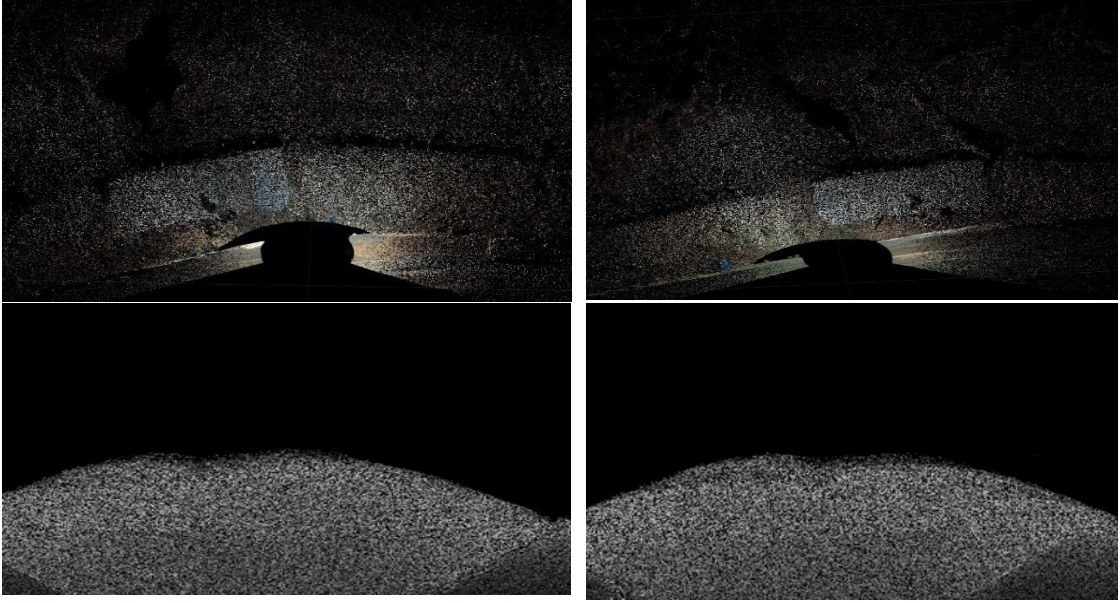
1 cm nokta yoğunluğundaki bindirmeli nokta bulutları ve bu nokta bulutlarına ait yansımaya görüntüleri



3 cm nokta yoğunluğundaki bindirmeli nokta bulutları ve bu nokta bulutlarına ait yansıma görüntüleri



5 cm nokta yoğunluğundaki bindirmeli nokta bulutları ve bu nokta bulutlarına ait yansıma görüntüleri



10 cm nokta yoğunluğundaki bindirmeli nokta bulutları ve bu nokta bulutlarına ait yansıma görüntüleri

Şekil EK-3.1. Yol şevinin 1. ve 2. tarama istasyonundan 0,5 cm, 1 cm, 3 cm, 5 cm ve 10 cm nokta sıklıklarına sahip nokta bulutu ve bu nokta bulutundan elde edilen yansıma görüntülerinin gösterimi.